

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie

Obor: Povrchová a podzemní voda



Matěj Kožíšek

**Dlouhodobé změny výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu
na vybraných horských stanicích v Česku**

Long-term changes in snow depth and snow water
equivalent at selected mountain stations in Czechia

Bakalářská práce

Praha 2020

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Michal Jeníček, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Téma práce

Dlouhodobé změny výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu na vybraných horských stanicích v Česku

Motivace

Probíhající zvyšování teploty vzduchu má mimo jiné za následek změnu podílu pevných srážek na celkových srážkách v chladném půlroce, a tedy i změny v celkové akumulaci sněhové pokrývky v horských oblastech. Tyto změny, společně s dřívějším nástupem jarního tání, způsobují změny v celkovém objemu a rozložení jarních odtoků a zásob vody v povodí.

Cíle práce

- 1) Zhodnocení současného stavu výzkumu (pomocí rešerše odborné literatury) týkajícího se dlouhodobých změn ve výšce sněhu a vodní hodnotě sněhu (SWE) a dopad těchto změn na odtokový režim
- 2) Analýza vybraných časových řad za účelem popisu meziroční variability a dlouhodobých trendů výšky sněhu, SWE a případně dalších sněhových charakteristik

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

První částí práce bude zhodnocení současného stavu výzkumu (pomocí rešerše odborné literatury) týkajícího se dlouhodobých změn ve výšce sněhu a vodní hodnotě sněhu (SWE) a dopad těchto změn na odtokový režim se zaměřením na horské oblasti v humidním klimatu (je možné ale zahrnout i jiné oblasti).

Druhá část práce bude tvořena analýzou vybraných časových řad za účelem popisu meziroční variability a dlouhodobých trendů výšky sněhu, SWE a souvisejících charakteristik (den maxima SWE, den roztátí sněhu, doba trvání sněhové pokrývky, úhrn zimních srážek, rychlost tání atd.) na vybraných horských stanicích Česka. K analýze budou využita data z měřicí sítě ČHMÚ. Trendy mohou být popsány například pomocí Mann-Kendallova testu.

Datum zadání práce: 29. 11. 2019

Jméno studenta: Matěj Kožíšek

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Michal Jeníček, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 10. 8. 2020

.....

Matěj Kožíšek

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce RNDr. Michalu Jeníčkovi, Ph.D. za užitečné rady a připomínky při tvorbě této práce, poskytnuté informační zdroje a data.

1. Abstrakt

Dlouhodobé změny výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu na vybraných horských stanicích v Česku

Bakalářská práce se zabývá tematikou dlouhodobého vývoje sněhové pokrývky v okrajových pohořích České republiky. Úvodní část je rešerší zahraniční a české odborné literatury zabývající se změnami parametrů sněhové pokrývky v závislosti na změně klimatu a také důsledky těchto změn na různé složky životního prostředí. Druhá část práce vychází z analýzy klimatických dat ze stanic nacházejících se v okrajových pohořích České republiky v období hydrologických roků 1980-2014. Mezi pohoří zahrnutá do tohoto výzkumu patří Šumava (Churáňov, Lenora a Husinec), Jizerské hory (Bedřichov a Desná), Krkonoše (Harrachov), Orlické hory (Deštné a Rokytnice v O. h.) a Moravskoslezské Beskydy (Lysá hora). Pro hodnocení trendů je použit statistický Mann-Kendall test. Změny sněhové pokrývky mají významný dopad na fungování mnoha krajinných procesů i na život obyvatelstva z hlediska budoucí dostupnosti vody a rekreace.

Klíčová slova: výška sněhu, vodní hodnota sněhu, dlouhodobé trendy, změna klimatu

Abstract

Long-term changes in snow depth and snow water equivalent at selected mountain stations in Czechia

This bachelor's thesis deals with the topic of long-term changes of snow cover in the peripheral mountain ranges in the Czech Republic. The first part is a research of foreign and czech literature dealing with changes in the parameters of snow cover depending on climate change and the consequences of these changes on various components of nature. The second part of the work consists of the analysis of climatic data from stations located in the peripheral mountains of the Czech Republic in the period of hydrological years 1980-2014. The mountains included in this research include Šumava (Churáňov, Lenora and Husinec), Jizera Mountains (Bedřichov and Desná), Krkonoše (Harrachov), Orlické Mountains (Deštné and Rokytnice v O. h.) and Moravskoslezské Beskydy (Lysá hora). The statistical Mann-Kendall test is used to evaluate trends. Changes in snow cover have a significant impact on the functioning of many landscape processes and on the life of the population in terms of future water availability and recreation.

Key words: snow depth, snow water equivalent, long-term changes, climate change

Obsah

1. Abstrakt	5
2. Úvod.....	8
2.1. - Základní informace o problematice.....	8
2.2. – Hypotézy a hlavní výzkumné otázky	9
3. Stav výzkumu změn sněhové pokrývky	10
3.1. – Základní charakteristiky sněhu	10
3.2. – Faktory ovlivňující sněhovou pokrývku	12
3.3. - Klimatická změna v ČR	14
3.4. – Dlouhodobé změny sněhové pokrývky ve světě	15
3.5. – Důsledky změn sněhové pokrývky	19
3.6. – Budoucnost vývoje sněhové pokrývky.....	20
4. Metody	22
4.1. Charakteristika klimatu a fyzicko-geografická charakteristika stanic.....	22
4.2. - Výběr stanic, zkoumaného období a použitých dat	31
4.3. - Metodika zpracování dat	31
4.4. - Metodika hodnocení trendů pomocí Mann-Kendall testu.....	33
5. Výsledky.....	34
5.1. - Vývoj klimatických faktorů souvisejících se sněhovou pokrývkou	34
5.2. - Vývoj parametrů sněhové pokrývky	40
6. Diskuse.....	47
7. Závěr	51
Zdroje.....	52
Internetové zdroje	56
Obrazové materiály	57

2. Úvod

2.1. - Základní informace o problematice

Sníh nepochybně hraje v České republice důležitou roli zejména v horských oblastech, kde se vyskytuje během podstatné části roku a kde hraje zásadní roli pro tvorbu odtoku a vytváření zásoby vody pro jarní období a doplňování zásob podzemní vody. Ta hraje důležitou roli pro velikost průtoku během letních měsíců ve všech významných českých řekách. Je velice důležité porozumět procesu dlouhodobých změn ve sněhové pokrývce, aby bylo možné odhadnout důsledky pro změny odtokových režimů českých řek do budoucnosti. V horských oblastech České republiky můžeme v posledních letech pozorovat výrazné změny zejména v časovém rozložení sněhových srážek v důsledku změny klimatu. Vlivem zvyšování průměrné teploty vzduchu se snižuje poměr sněhových srážek vůči srážkám celkovým.

První část práce bude tvořena rešerší odborné literatury věnující se tématu dlouhodobého vývoje sněhové pokrývky. V úvodu první části budou zmíněny charakteristiky základních parametrů sněhové pokrývky (např. SWE (vodní hodnota sněhu), maximální výška SP, datum roztátí sněhu atd.) Dále budou uvedeny příklady studií na toto téma z některých světových pohoří (Alpy, Ťan-Šan atd.) Dále také budou diskutovány parametry ovlivňující sněhovou pokrývku (teplota vzduchu, srážky a poměr sněhových a celkových srážek).

Dále bude práce obsahovat klimatickou a fyzicko-geografickou charakteristiku jednotlivých stanic. Praktickou část práce bude tvořit analýza klimatických dat z různých stanic českých hor za období od roku 1980 do 2014 a výpočet trendů v jednotlivých klimatických a sněhových parametrech pomocí Mann-Kendall testu. Ke tvorbě praktické části jsou použita klimatická data sítě ČHMÚ (teplota, výška sněhu, úhrny srážek a vodní hodnota sněhu).

2.2. – Hypotézy a hlavní výzkumné otázky

Hlavní výzkumné otázky

Existuje statisticky významný trend v parametrech charakterizujících sněhovou pokrývkou, jako je například maximální výška sněhu, SWE, datum tání sněhové pokrývky, počet dní se sněhem a poměr sněhových a dešťových srážek?

Jsou rychlosti změn závislé na nadmořské výšce stanic?

Jsou změny způsobeny snižováním srážek v zimním období, zvyšováním teploty, nebo kombinací obou faktorů?

Hypotézy

1. Maximální výška sněhu se nemění, sezóna se sněhovou pokrývkou se celkově zkracuje a sníh taje dříve.
2. Změny jsou rychlejší na stanicích s vyšší nadmořskou výškou.
3. Změny jsou způsobeny zvyšující se teplotou vzduchu v zimních měsících.

Cíle práce

Cílem práce je vyhodnotit současné poznatky o změnách ve sněhové pokrývce, a to hlavně délky období se sněhovou pokrývkou, SWE (vodní hodnotou sněhu) a průměrnou výškou sněhové pokrývky. V rámci praktické části bude provedena analýza dat ze sněhoměrných a meteorologických stanic sítě ČHMÚ v období druhé poloviny 20. století a počátku 21. století. Hlavní náplní praktické části je hledat trendy v různých parametrech sněhové pokrývky.

3. Stav výzkumu změn sněhové pokrývky

Hydrologie sněhu je specializovaný obor hydrologie, který má zvýšený význam pro vysoké zeměpisné šířky a horské oblasti. V mnoha částech světa jsou zásoby vody, řek a podzemních vod pro domácí, zavlažovací a průmyslové zdroje tvořeny z tání sněhu. Podrobné porozumění sněhové hydrologii má tedy velký význam. Studie dopadů globálního oteplování také podnítila zájem o hydrologii sněhu, protože se předpokládá, že zvyšování teploty vzduchu a další faktory mají zásadní vliv na sněhovou pokrývkou. (D. R. DeWalle and A. Rango 2008)

3.1. – Základní charakteristiky sněhu

V této kapitole jsou blíže specifikovány parametry sněhu, které jsou podstatné pro téma dlouhodobých změn sněhové pokrývky.

Hustota sněhu je měřena jako hmotnost sněhu o určitém objemu. Jednotkou hustoty sněhu je $[\text{kg}/\text{m}^3]$, nebo $[\text{g}/\text{cm}^3]$. Hustota sněhu se ale s průběhem času zvyšuje sleháváním. Může ho urychlit silný vítr či teploty vzduchu nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, které zapříčiňují natávání sněhové pokrývky. Hustota čerstvého sněhu se v chladném kontinentálním klimatu pohybuje v rozmezí $50\text{--}100\text{ kg}/\text{m}^3$. Na konci sezóny je hustota sněhu $350\text{--}550\text{ kg}/\text{m}^3$. Čas je však pro hustotu sněhu nejdůležitějším faktorem. Hustota sněhu nejvíce roste přibližně 30 dní po akumulaci a po delší době se růst hustoty sněhu zpomaluje. (DeWalle a Rango, 2008)

Teplota sněhu se udává ve stupních Celsia $[^{\circ}\text{C}]$, i když může být v zahraniční literatuře udána i v jiných jednotkách. Za normálního atmosférického tlaku nemůže teplota sněhu přesáhnout 0°C . Mění se během zimy, ale i v průběhu dne. Teplota sněhu je ovlivňována od povrchu, a to teplotou okolního vzduchu, sluneční radiací a deštěm dopadajícím na její povrch. Zespoda se sněhová pokrývka zahřívá od povrchu země, a to přísunem energie z podloží. Oteplování sněhové pokrývky od jejího povrchu značně urychluje infiltrace vody v kapalném skupenství do nižších vrstev pokrývky ze srážek či táním povrchu sněhové pokrývky a infiltrací tavné vody do hlubších vrstev sněhu. Sněhová pokrývka se tedy od podloží postupně ohřívá až na teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V jarním období dochází ke stejnému procesu ve směru od povrchu sněhové pokrývky. Pokud teplota sněhu dosáhne v celém svislém profilu hodnoty $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, nazýváme tuto pokrývkou jako zralou (DeWalle a Rango, 2008).

Vodní hodnota sněhu (SWE) je definována jako vertikální výška vody, která by vznikla roztáním celé vrstvy sněhové pokrývky. Běžně je udávána v milimetrech. Může být také vypočtena jako suma součinu tloušťky všech jednotlivých vrstev ve sněhové pokrývce (které jsou pokládány za homogenní) a jejich hustoty (Singh a Singh, 2001).

Z hlediska hydrologie se tedy jedná o jeden z nejdůležitějších parametrů, protože jasně kvantifikuje množství vody ve sněhu. V tomto směru se jedná o podstatnější parametr, než je výška sněhu.

Vodní hodnota sněhové pokrývky se dá vypočítat pomocí vzorce $SWE = d * (\rho_s / \rho_w)$, kde d je výška sněhové pokrývky, ρ_s hustota sněhu a ρ_w hustota vody (DeWalle a Rango, 2008), nebo se měří pomocí hydrostatického snímače tlaku (sněhová váha), který je umístěn ve speciálním sněhovém polštáři o průměru 3 metry. Snímač je naplněn nemrznoucí směsí a je překryt vrstvou písku a šterku tak, aby by jeho povrch zarovnan s okolím. Velká plocha polštáře snižuje chybu měření danou soudržností sněhové pokrývky na okrajích polštáře. (<https://www.fiedlerams.cz/>)

Výška sněhu se na meteorologických stanicích měří s přesností na centimetry sněhoměrnou latí, nebo pomocí automatického přístroje pomocí ultrazvukového snímače. Jako souvislá sněhová pokrývka se považuje taková, když je okolí stanice je pokryto alespoň padesát procent plochy vrstvou sněhu vysokou alespoň 1 cm. Nesouvislá pokrývka zaujímá méně než 50 % plochy v okolí stanice. Rovněž může být měřena také mocnost nového sněhu za uplynulých 24 hodin, a to využitím sněhoměrného prkénka (Vysoudil, 1997). Označením výšky nového sněhu je **HN** a celkové výšky sněhu **HS** (Colbeck et al., 1990). V české literatuře se pro celkovou výšku sněhu častěji používá zkratka **SCE**.



Obr. 1 – Stanice pro automatické měření výšky sněhu a SWE

3.2. – Faktory ovlivňující sněhovou pokrývku

Faktory ovlivňující sněhovou pokrývku rozdělujeme na faktory klimatické a geografické. Klimatické mají přímý vliv na genezi sněhové pokrývky, jsou pro její formování zcela zásadní a patří mezi ně například úhrny srážek a teplota vzduchu. Ostatní faktory jsou doplňkové a sněhovou pokrývku ovlivňují pouze sekundárně (vítr, solární radiace). Geografické faktory (nadmořská výška, morfologie reliéfu) neovlivňují sněhovou pokrývku přímo, ale mají vliv na klimatické faktory (snižování teploty s nadmořskou výškou, zvyšování srážek s nadmořskou výškou) (DeWalle, a Rango, 2008).

Srážky

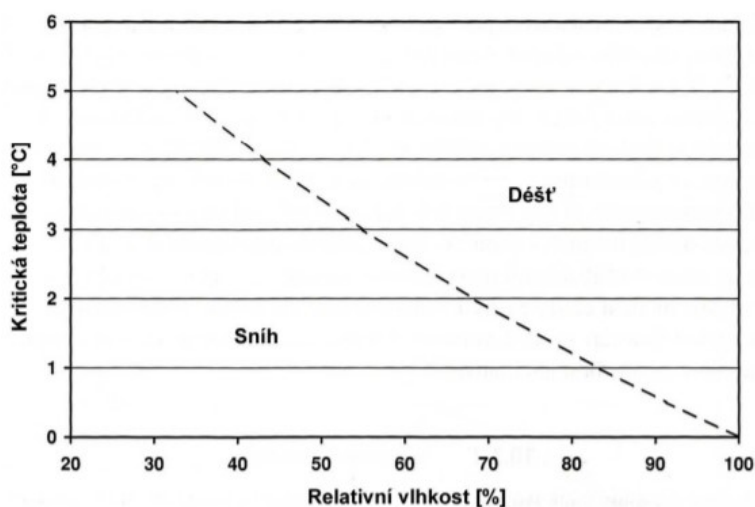
Úhrny srážek jsou pro vznik sněhové pokrývky naprosto klíčovým faktorem, bez kterého by byl vznik sněhové pokrývky naprosto nemožný. Dalším důležitým parametrem, který se se srážkami pojí, je teplota vzduchu, která ovlivňuje skupenství, ve kterém srážky vypadávají. To, že jsme v zimním období a ve vyšších nadmořských výškách ještě negarantuje, že srážky budou v pevném skupenství. Může totiž docházet k přechodu výrazných teplých front, které přinášejí často silné dešťové srážky i v horských oblastech.

Pokud v cestě vlhkého proudění (v případě ČR západního) stojí překážka v podobě horského pásma, vypadne naprostá většina srážek na západních úbočích hor a v závětrí hor tak vzniká srážkový stín. Příkladem efektu srážkového stínu v ČR může být Žatecko a Roudnicko v závětrí Krušných hor, kde roční úhrny dosahují hodnot pouze kolem 450 mm/rok. Příkladem opačného efektu na návětrné straně jsou Jizerské hory, a to především severozápadně orientované údolí Smědé, na jehož konci dosahují průměrné roční úhrny 1700 mm, což je nejvyšší průměrný úhrn srážek v celé České republice a jsou zde časté i silné povodně (Bílý potok, Hejnice a Tanvald). Průměrný úhrn srážek se zvyšuje s nadmořskou výškou a maxima dosahuje (ve středoevropských podmínkách například v Alpách či Tatrách) ve výšce kolem 2500 m n. m. Nad touto hranicí se projevuje takzvaná inverze srážek, tedy pokles srážkových úhrnů. (Whiteman, 2000)

Teplota a vlhkost vzduchu

Teplota a vlhkost vzduchu ovlivňují skupenství srážek dopadajících na zemský povrch. Sníh padající k zemskému povrchu je ochlazován ztrátou energie pro jeho sublimaci. V některých podmínkách se pak sněhová vločka může vyskytovat i při teplotách vyšších, než je bod tání vody. Následující graf ukazuje závislost vlhkosti vzduchu a teplotu fázové změny skupenství

srážek. Z grafu je patrné, že se sněžení může vyskytovat až do teplot dosahujících 4 °C při vlhkosti kolem 40 % (DeWalle, 2008).



Obr. 2 - Teplota tání sněhu v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu (zdroj: DeWalle a Rango (2008), upraveno)

Vítr

Vítr je schopný transportovat sníh na velké vzdálenosti a významně měnit rozložení výšky sněhu. Na místech, kde bychom na základě ostatních faktorů čekali sněhu nejvíce (např. na horských hřebenech a vrcholcích hor) jsou často díky deflaci výšky sněhu poměrně nízké (Sněžka, Modré sedlo). Naopak na závětrných stranách hor například úbočí Studniční hory směrem do Modrého dolu pozorujeme akumulace sněhu o velkých mocnostech (Mapa republiky) a četné převěje.



Obr. 3 – Sněhové pole Mapa republiky na konci dubna 2018 (Jiří Fremuth, 2018)

Nadmořská výška

Nadmořská výška sněhovou pokrývkou neovlivňuje přímo, ale má velký vliv na faktory, které mají přímou souvislost se sněhovou pokrývkou. S rostoucí nadmořskou výškou mezi tyto faktory patří klesající teplota vzduchu, vyšší roční úhrny srážek (pouze na návětrné straně), jiná vegetační skladba (ve většině případů nižší intercepce sněhových srážek) a větší vliv větru na transport sněhu než v nižších polohách. Zajímavé výsledky přinesl výzkum Hříbika a Škvareniny (2007) z Kráľovej hole v Nízkých Tatrách, kdy v pásnu lesa s růstem nadmořské výška narůstala i vodní hodnota sněhu, ale v pásnu nad hranicí lesa začala klesat. Došlo i k dřívějšímu odtávání sněhové pokrývky ve vrcholových polohách než v polohách středních. Vliv nadmořské výšky se projevuje i v rychlosti změn sněhové pokrývky. Ve vyšších nadmořských výškách je obvykle trend změn hůře pozorovatelný, pokud vůbec existuje.

3.3. - Klimatická změna v ČR

Klimatická změna způsobená kombinací přirozených změn a antropogenních zásahů je hlavním důvodem změn nejen sněhové pokrývky. Porozumění této problematice je klíčové pro modelování budoucích změn sněhové pokrývky. České republiky se týká změna klimatu od období průmyslové revoluce, která znamenala zásadní přelom v intenzitě dopadů lidské činnosti na světové klima a přírodu obecně.

Tolasz v Atlase podnebí Česka uvádí, že v období 1961–2000, roční průměrná teplota v ČR silně kolísala, nicméně měla statisticky významný stoupající trend $+0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ za deset let (Tolasz, 2007). Oteplování bylo nejvíce výrazné v zimním a jarním období a nejméně významné na podzim. Nejteplejší byl rok 2018, kdy průměrná teplota dosahovala $9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tento rok byl mimořádně nadnormální s odchylkou $+1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ od normálu z let 1981–2010) (Tolasz, 2018) dále byl silně teplotně nadprůměrný rok 2019 s průměrnou teplotou $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CHMU, 2020). Velice teplé byly i roky 2014 a 2015, oba s průměrnou teplotou $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tolasz, 2016). Celkový trend zvyšování průměrných ročních teplot byl v letech 1961–2000 překryt kratšími výkyvy, a i v posledním desetiletí tohoto období se vyskytl jeden ze tří nejchladnějších roků celého období 1961–2000, a to konkrétně rok 1996 s průměrnou teplotou pouze $6,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podle ČHMÚ se v ČR zvýšila průměrná teplota za celé 20. století

o 1,1–1,3 °C. V roce 2018 byla v České republice zaznamenána nejvyšší odchylka od teplotního průměru v Evropě a druhé největší na světě. (ČHMU, 2007).

3.4. – Dlouhodobé změny sněhové pokrývky ve světě

Změny v rozsahu a množství sněhové pokrývky v Evropě a Asii jsou bedlivě sledovanou věcí kvůli dopadu na globální klima a regionální vodohospodářský management. Výška sněhu v Eurasii v posledních letech postupně klesá a pokles je dále umocňován polárním zesílením v oblasti Sibíře, která reprezentuje nejsilnější a nejrychlejší oblast oteplování ve vyšších zeměpisných šířkách severní polokoule (Cohen et al., 2014). Polární zesílení je jev, který se projevuje tím, že jakákoli změna v čisté radiační rovnováze (například skleníkový efekt) má sklon ke větší změně teploty v blízkosti pólů, než je průměrná změna na Zemi (Lee, 2014). Reakce sněhové pokrývky na tyto změny je ale komplikovanější. Na jedné straně až 70 % stanic v Eurasii prokázalo v letech 1980-2006 trend na dřívější roztávání sněhu a pozdější nástup sněhové pokrývky. (Peng et al., 2013) Tato skutečnost je dále podpořena faktem, že počet dní se sněhem na Sibíři se mezi lety 1970-2013 snížil až o 4.72 % (Yu, 2017)

Ve Švýcarských Alpách bylo ve druhé polovině dvacátého století možné pozorovat na stanicích do 1300 m n. m. výrazné snižování výšky sněhové pokrývky, vodní hodnoty sněhu a snižování počtu dní se sněhem (Jeníček, 2018). Dny se sněhem tedy přicházejí později a k tání dochází dříve. Obzvláště rychlé změny začaly od roku 1990 od kdy se rychlost změn postupně akceleruje. Na stanicích s vyšší nadmořskou výškou (>2000 m n. m.) však žádné významné změny v parametrech pozorovány nebyly. Bylo to zapříčiněno tím, že v těchto výškách stále teploty i přes oteplování nepřekračují bod mrazu a neovlivňují tak příliš sněhovou pokrývku (Scherrer, 2004)

V Rakouských Alpách je situace o něco komplikovanější. Po porovnání dvou dvacetiletých period, a to v letech 1896–1916 a 1980–2000 a bylo zjištěno, že podstatné trendy v počtu dnů se sněhem bylo možné detekovat pouze na stanicích na jihu země. V oddělené analýze dat ze čtrnácti stanic po dobu sta let přineslo stejné výsledky jako analýza předchozí, a tudíž by se výsledky daly považovat za odpovídající.

V Italských Alpách byl po analýze časových řad z let 1920–2009 zjištěn klesající trend ve výšce sněhu i počtu dnů se sněhem, a to překvapivě i na stanicích ve výškách 2000–

3000 metrů nad mořem (Marty, 2017). Tyto změny jsou primárně přisuzovány změně poměru sněhových a dešťových srážek v důsledku stoupající teploty.

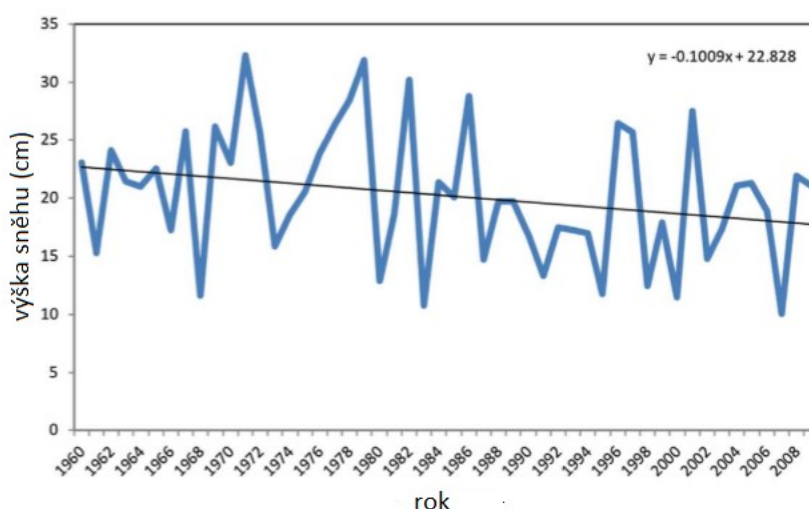
Povodí Adiže je jedním z nejdůležitějších povodí v Itálii, a to zejména kvůli své velké rozloze (12000 km²), délce (409 km) a své využitelnosti pro výrobu elektrické energie ve vodních elektrárnách. Nejdůležitější zdrojnice Adiže se nacházejí v oblasti Alp, z čehož vyplývá, že jsou silně ovlivňovány sněhovými poměry v horských oblastech (Mei et al., 2014). Oblast povodí je ovlivňována zejména jihozápadními větry a cyklonami (Xoplaki, 2016). V oblasti jihozápadních Alp byl pozorován lehce negativní trend v množství srážek (Brunetti, 2006). Pozdější výzkumy přímo z oblasti povodí Adiže však žádný trend neukazují (Lutz, 2016). Brunetti (2006) dále zjistil výrazně pozitivní trend teplot v povodí. Hlavním omezením ve výzkumu vývoje sněhové pokrývky v této oblasti je malé množství pozorovacích stanic ve vyšších nadmořských výškách nad 2000 m n. m. Devadesátá léta 20. století byla v Alpách obzvláště suchá a teplá, což vedlo ke snížení výšky sněhové pokrývky a snížení počtu dnů se sněhem. Nejvíce viditelné byly tyto změny na stanicích do nadmořské výšky 1650 m n. m. Na stanicích nad touto hranicí je možné vysvětlit změny pomocí jiných faktorů, jako je například vítr, nebo změna poměru tuhých a kapalných srážek. Sezóny s obzvláště nízkými výškami sněhu a počtem dní se sněhem, jako například roky 1989 a 2001 výrazně ovlivnily i oblasti nad 1650 m n. m. Byla nutná některá opatření, jako například umělé zasněžování, kvůli minimalizaci dopadů na turistický ruch. Výsledky ukazují, že povodí Adiže po roce 1988 zaznamenalo výrazné zkrácení doby sněhové pokrývky a průměrné výšky sněhové pokrývky. Toto snížení je pozorováno na nízkých i vysokých stanicích, i když můžeme rozlišovat chování časových řad umístěných nad a pod 1650 m n. m. Zejména místa s nízkou nadmořskou výškou jsou více ovlivněna variabilitou klimatu a citlivější na zvýšení teploty než místa s vysokou nadmořskou výškou (Marcolini, 2017).

Ve Francii je situace zcela opačná oproti Rakousku a větší úbytek sněhu je pozorován na severu Francouzských Alp. Znovu je také patrný větší vliv na stanicích v nízkých a středních polohách. (Marty 2013)

Sníh v semiaridních oblastech centrálních And poskytuje důležitý zdroj vody pro více než deset milionů lidí a je zásadní pro fungování zemědělství v těchto oblastech. Hydrologická rovnováha v kryosféře je silně ovlivňována množstvím srážek a výškou sněhu (Masiokas et al., 2006). Na vysokohorských ledovcích je sluneční energie potřebná pro tání sněhu a ledu vyvažována vysokým albedem, přičemž je velké množství energie odraženo od

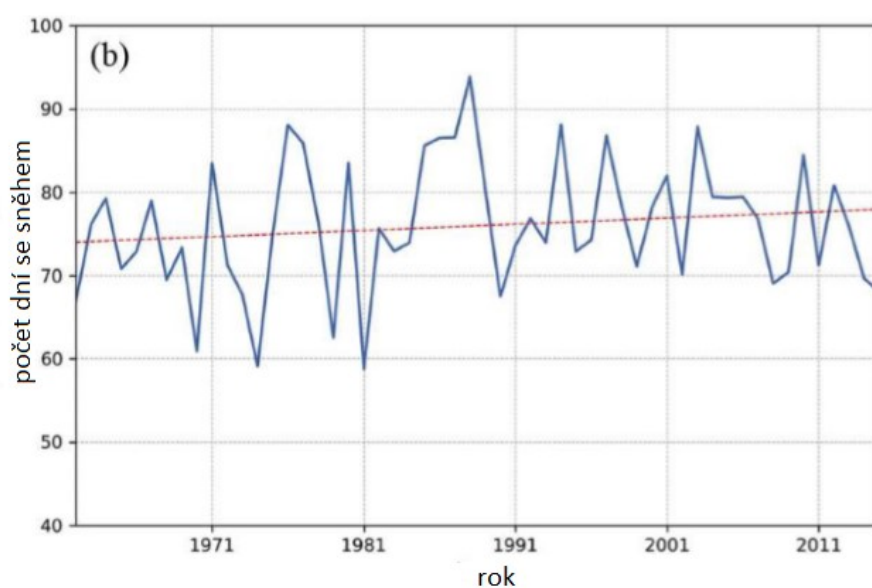
povrchu zpět. Čerstvý sníh je například téměř dokonalým povrchem pro odrazení energie s albedem dosahujícím až 0,98. Albedo se s průběhem času snižuje, kvůli metamorfóze sněhové pokrývky až na hodnoty 0,46 (Cuffey and Paterson, 2010). V letech 2000-2016 se průměrný rozsah sněhové pokrývky ve zkoumaném území snížil o 13,4 %, přičemž silnější trend byl pozorován na východní straně pohoří i přesto, že na východní straně byla vyšší střední nadmořská výška. Největší změny byly pozorovány na začátku a konci sněhové sezóny. Počet dní se sněhem se během pozorované doby snížil o 43 dní. Přičemž trendy byly výrazné pod nadmořskou výškou 4500 m n. m. na východní a 3500 m na západní straně pohoří. (Malmros et al., 2018)

V povodí Velkých jezer na hranicích Spojených států a Kanady je také pozorován klesající trend v průměrné výšce sněhové pokrývky během ledna, února a března (Suriano, 2019). Na západě Spojených států je na většině povodí sníh nejvýznamnějším zdrojem odtoku, což tuto oblast činí velmi citlivou na klimatické změny (Barnett et al., 2005). Úbytek sněhu a dřívější tání bylo pozorováno v Kaskádovém pohoří a v pohoří Sierra Nevada. Zvyšování průměrné teploty, snižování úhrnů sněhových srážek a dřívější nástup jara jsou očekávány po celém západě Spojených států (McCabe a Clark, 2005). Zimní a jarní teploty se v průměru snížily o 1 °C v posledních padesáti letech (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Většina významných kladných trendů byla pozorována u zimní teploty vzduchu. Trendy ve snižování SWE byly pozorovány v povodí řek Colorado a Rio Grande. Významná změna nastala také v délce trvání sněhové pokrývky, kdy byl pozorován pozdější nástup a dřívější tání sněhu (Clow, 2010)



Obr. 4 – Vývoj průměrné výšky sněhu v povodí Velkých jezer (Suriano 2019, upraveno)

Na Zemi, ale existují i výjimky, kdy vlivem oteplování došlo ke zvýšení výparu a tím ke zvýšení srážek. V kombinaci s dostatečnou nadmořskou výškou pro udržení teploty pod bodem mrazu dochází ke stoupajícím trendům ve výšce sněhové pokrývky. K takovým podmínkám dochází například v asijských pohořích Ťan-Šan nebo Karákóram. Na Ťan-Šanu došlo k průměrnému nárůstu sněhové pokrývky +2.08 cm na dekádu, což je v kontrastu k vývoji na severní polokouli. Zvýšil se také počet dnů se sněhem o +3.4 dne za dekádu na severních svazích (viz Obr. 4). Bez zajímavosti není fakt, že ve vysokých nadmořských výškách se sezóna se sněhem naopak zkrátila. (Li, 2019)



Obr. 5 – Průměrný počet dní se sněhem v pohoří Ťan-Šan (Li 2019, upraveno)

Na Tibetské náhorní plošině dochází k rozsáhlým změnám ve sněhové pokrývce, která je klíčovým komponentem změny klimatu a je podstatná pro mnoho hydrologických a biologických pochodů. Při ubývání sněhové pokrývky dochází ke snižování albeda a tím se dále zrychluje proces ohřívání povrchu země a dochází k regionálnímu zvýšení teploty v oblasti (Barnett et al., 2005). Tibetská plošina se střední výškou přesahující 4000 metrů nad mořem je považována za třetí pól planety a obsahuje nejvyšší rozsah kryosféry mimo polárních oblastí (Immerzeel a Bierkens, 2012). Sněhová pokrývka leží na Tibetské plošině v relativně nízkých zeměpisných šířkách a ve členitém a komplexním terénu. Trendy ve vývoji sněhové pokrývky se silně liší podle doby pozorování. Například v letech 1957–1992 se denní výšky sněhu zvyšovaly. V letech 1992–2012 již byl pozorován slabý pokles (Qin et al., 2006). Podobné změny trendu byly pozorovány taktéž u výšky sněhové pokrývky, kde se mezi lety 1961 a 1990 zvyšovala rychlostí 0.32 mm za dekádu, zatímco mezi lety 1991 a 2005 se snižovala výrazně rychleji -1.8 mm/ 10 let (You et al., 2011). U počtu dní se sněhem

je trend mezi lety 1961–2010 negativní, přičemž jsou změny nejvýraznější zejména během léta a podzimu (Xu et al., 2017). Hlavním důvodem těchto změn je zejména zvýšení teploty vzduchu a úbytek sněhových srážek. Dále také změna poměru sněhových a dešťových srážek. Ubývání zimních srážek snižuje akumulaci sněhové pokrývky a zvýšené letní srážky zrychlují odtávání. (Huang et al., 2016)

Ukazuje se, že rozloha ledovců a sněhová pokrývky v pohořích Himaláje, Karákorámu a Hindúkuše se snižuje, což má za následek vážné důsledky na dostupnost vody pro populaci žijící níže v povodí. Pomocí výzkumu založeného na snímkování Landsat za období 1993 až 2019 v povodí horního Indu bylo zjištěno, že maximální sněhová pokrývky byla přibližně 20 675 km² pozorována v dubnu 2017, poté 1996 a 1999, když to bylo asi 18 800 km²; minimum asi 14 500 km² bylo zaznamenáno v dubnu 1993, 2011 a 2018. Výsledky ukazují, že v době trvání sněhové pokrývky došlo k velmi mírnému nárůstu. Maximální výška zasněžené oblasti, extrahovaná z digitálního modelu elevace družicového topografického skenování (SRTM DEM) ve studované oblasti je 7889 m, zatímco minimální nadmořská výška je 991 m. Teplota pod bodem mrazu po většinu roku se vyskytuje nad výškou 3000 m, což naznačuje, že tyto oblasti jsou po většinu roku pokryty sněhem a ledovci. Teploty -20 °C až -25 °C byly přítomny pouze na několika místech, a to ve velmi vysoké nadmořské výšce nad 6000 m. Výsledek ukazuje, že sněhová pokrývky v měsíci dubnu během let 1993–2015 mírně poklesla. (Jabbar et al., 2020)

3.5. – Důsledky změn sněhové pokrývky

Přibližně jedna třetina povrchu Země je v některé části roku pokryta sněhem. Sněhová vrstva ovlivňuje klimatické podmínky pomocí odražení slunečního záření a zabraňuje tak jeho absorpci, která zvyšuje teplotu povrchu Země. Kratší trvání zimní sezóny jde ruku v ruce s prodlužováním vegetační sezóny. (Robinson, 2018) Snižuje se také izolační funkce sněhové pokrývky a při nízkých teplotách dochází k hlubšímu promrzání půdy, což může vést k poškození kořenového systému rostlin, nebo snížení infiltrační schopnosti půdy a tím vytváření jarních povodní. (Mudryk et al., 2018) Voda, která nemůže infiltrovat vytváří povrchový odtok a umocňuje se eroze půdy. (Øygarden, 2003) Je omezeno doplňování půdní vlhkosti (Gray et al., 2001) a hluboká perkolace (Johnsson a Lundin, 1991). Sníh také chrání půdu před vysycháním během zimy v důsledku slunečního záření, které je sněhem izolováno. (Iwata et al., 2010)

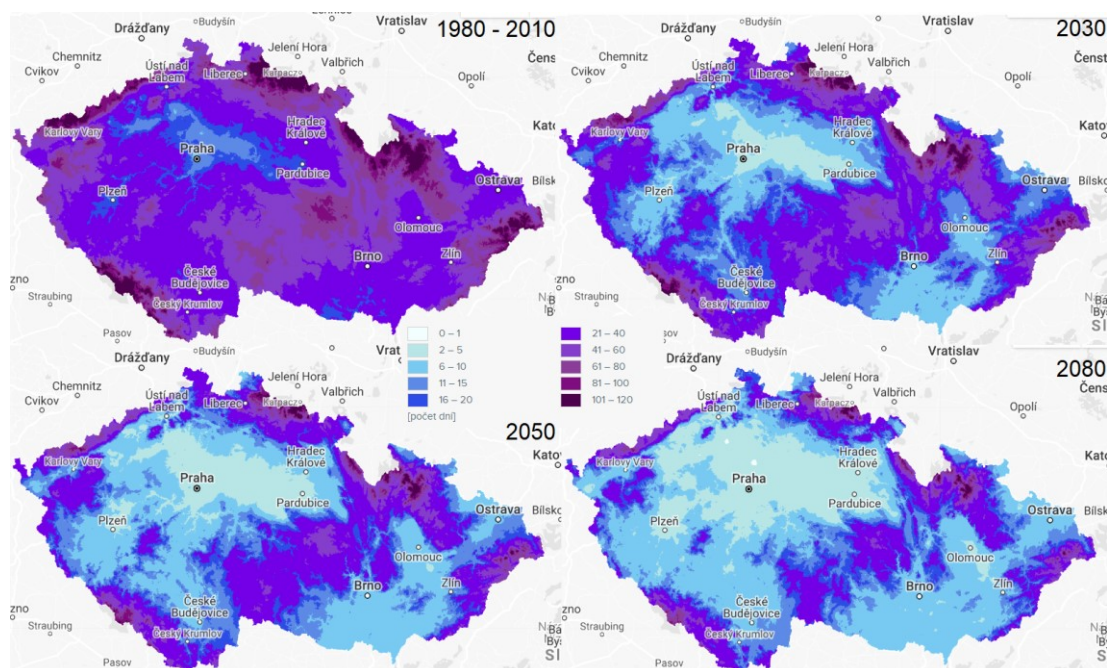
V regionálním a lokálním měřítku je zásoba vody ve sněhu důležitá pro vodohospodářský management, předpověď povodní nebo zemědělství. Voda ze sněhu poskytuje v případě ČR významný zdroj vodnosti pro velkou část řek. Slabší zimy z pohledu sněhu jsou jednou z příčin nízkých letních průtoků (Jeníček, 2020) a tento nedostatek se může promítnout do problémů například s lodní dopravou, nedostatkem vody pro průmysl a zavlažování zemědělské půdy. Tyto problémy jsou zvláště výrazné na řekách bez větších přehrad, tedy například na Labi před soutokem s Vltavou, kde jsou v létě často velice nízké průtoky klesající až k hodnotám kolem 30 m³/s. Již zmíněná řeka Vltava takové nízké průtoky nemá, a to hlavně kvůli velkým přehradám, které zachytí vodu z jarního tání a postupně jí během léta odpouštějí. Za zmínku stojí i problémy lyžařských areálů se zajištěním dostatku sněhu na sjezdovky. Jsou tedy nuceny využít umělé zasněžování, které znovu ovlivňuje průtoky v horských tocích. Nedostatek vody ze sněhových srážek se tedy může promítnout hned v několika ohledech.

3.6. – Budoucnost vývoje sněhové pokrývky

Se zvyšující se teplotou vzduchu bude více srážek vypadávat v kapalně formě během zimní sezóny (Foster et al., 2016). Tyto změny v poměru sněhových a celkových srážek (snowfall fraction) povedou ke snižování výšky sněhové pokrývky. Na velkých alpských povodích v nadmořské výšce nad 3000 m n. m. se očekává snížení akumulace sněhu až o 50 % a téměř žádnou sněhovou pokrývku ve výškách do 1200 m n. m. do konce 21. století (Marty, 2017). Vyšší teploty budou mít za následek zvyšování zimních průtoků (Laaha et al., 2016), vysoké průtoky dříve na jaře (Blahušiaková a Matoušková, 2015). Ovlivněno bude také doplňování podzemních vod a tím se budou snižovat průtoky v tocích na konci jara a v létě (Tague a Grant, 2004).

Do budoucna předpokládáme další zhoršování parametrů sněhové pokrývky v České republice. Intenzita těchto změn bude závislá zejména na vývoji vypouštění emisí do ovzduší. Pro Českou republiku existuje webová stránka klimatickazmena.cz kde se nachází interaktivní mapy výstupů z klimatických modelů pro několik desítek parametrů. Pro tento výzkum jsou podstatné zejména parametry Průměrná roční teplota vzduchu, Průměrný roční úhrn srážek, Sněhová pokrývka nad 3, 10 a 30 cm a Výška sněhové pokrývky v únoru, březnu a dubnu. K dispozici jsou tři různé scénáře emisí. Jako příklad ukázky modelu je vybrána mapa průměrného počtu dní se sněhovou pokrývkou nad 10 cm pro střední scénář

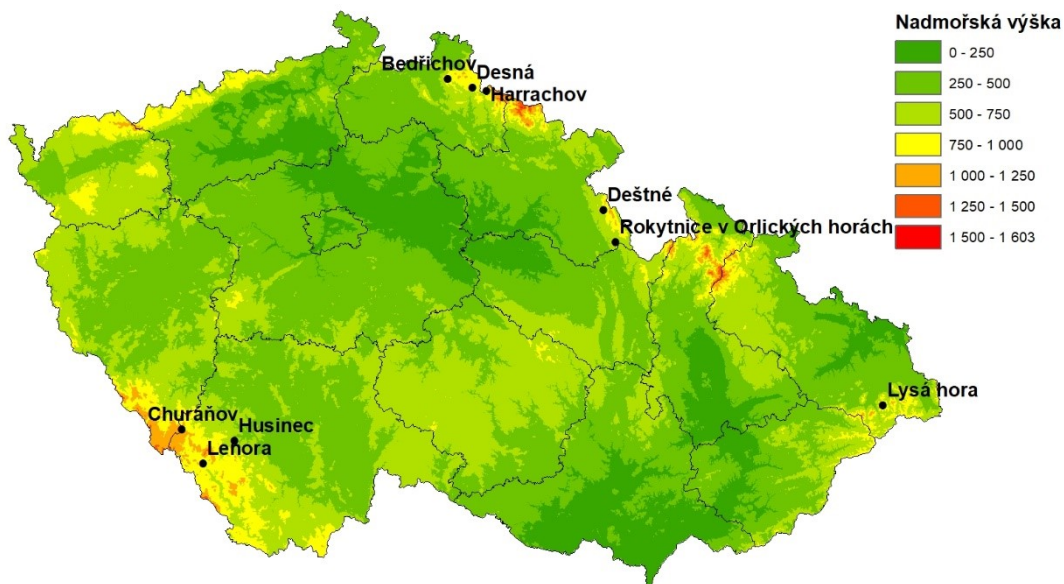
emisí. Je dobře vidět, že se změna nejvíce drasticky projeví v nízkých polohách, kde se sníh v budoucnu vyskytovat takřka nebude. Změny jsou ale pozorovatelné ve všech nadmořských výškách. Například na Šumavě se očekává snížení počtu dní se sněhovou pokrývkou nad 10 cm až o třetinu (klimatickazmena.cz).



Obr. 6 – Budoucí vývoj počtu dní s pokrývkou nad 10 cm pro střední emisní scénář (klimatickazmena.cz)

4. Metody

4.1. Charakteristika klimatu a fyzicko-geografická charakteristika stanic



Obr. 7 – Přehledová mapa zkoumaných stanic

Šumava

Šumava je nejrozsáhlejší horský celek v ČR nacházející se na jihozápadě území na hranicích se spolkovou republikou Bavorsko a částečně i s Rakouskem. Nejvyšší horou celého pohoří je Grosser Arber (Velký Javor) v Bavorsku s nadmořskou výškou 1456 m n. m. Na české straně pohoří je to Plechý s nadmořskou výškou 1378 m n. m. Pohoří se nachází na hlavním evropském rozvodí mezi Severním a Černým mořem. Konkrétně se jedná o povodí Labe a Dunaje.

Šumava je jedním z nejstarších evropských pohoří a tvoří jej předprvohorní až prvohorní horniny, a to především žuly, ruly, svory a další vyvřelé horniny. Geologicky patří k celku Moldanubikum. Délka pohoří ve směru SZ -> JV je přibližně 190 km a v nejširším místě 45 km. Na severozápadě Šumava navazuje na Český les a na východě hraničí

s Novohradskými horami. Šumava má charakter ploché hornatiny s celkem nízkou relativní výškové stupňovitostí a příkřejšími jižními svahy na Bavorské straně. Pohoří je kryto mocnými kvartérními zvětralinami se znaky glaciální a periglaciální modelace. Střední výška na České straně činí 921 m. n. m. a střední sklon svahů je cca. 7-8 °.

Na Šumavě se průměrná teplota vzduchu pohybuje v závislosti na nadmořské výšce od 6 °C v 750 m m. m. do 3 °C ve 1300 m n. m.). Výjimky tvoří inverzní oblasti jako je údolí Vltavy nad vodní nádrží Lipno a také lokality v oblasti Plání, a to například Jezerní slat', kde byla naměřena nejnižší teplota na Šumavě -41,6 °C, nebo Horská Kvilda. Úhrny srážek se pohybují mezi 800 až 900 mm na SZ pohoří ve srážkovém stínu a 1600 mm na hřebenech nejvyšších partií pohoří. Pohoří je prameništěm mnoha významných řek. Jedná se zejména o Vltavu na straně české a řeku Regen, která je se vlévá do Dunaje. Dále za zmínku stojí i Otava, Úhlava nebo Blanice. Pro Šumavu jsou charakteristická také ledovcová jezera, která jsou na české straně takřka jediná tohoto druhu v České republice (Anděra, 2003)

Churáňov

Stanice Churáňov se nachází v nadmořské výšce 1118 m n. m. u obce Zadov na vrcholu hory Churáňovský vrch. Průměrná roční teplota je 5 °C. Nejchladnějším měsícem je leden s průměrnou teplotou -3,3 °C a nejteplejším měsícem je červenec s teplotou 13,8 °C. Průměrný roční úhrn srážek činí 1040 mm, přičemž měsícem nejbohatším na srážky je červenec se 120 mm a nejsuššími měsíci jsou duben a říjen se 69 mm. Nachází se ve Chráněné krajinné oblasti Šumava. Leží na rozvodí toků Losenice a Spůlka. V bezprostřední blízkosti se nachází Přírodní rezervaci Malý Polec, která chrání vrchovištní rašeliniště.

Lenora

Stanice Lenora se nachází v nadmořské výšce 784 m n. m. u obce Houžná na jihovýchodním úbočí bezejmenné hory. Průměrná roční teplota je 6 °C. Nejchladnějším měsícem je leden a únor s teplotou -2 °C a nejteplejším měsícem je červenec a srpen s teplotou 16 °C. Průměrný roční úhrn srážek činí přibližně 900 mm, přičemž měsícem nejbohatším na srážky je červenec se 140 mm a nejsuššími měsícem je říjen se 65 mm. Nachází se ve Chráněné krajinné oblasti Šumava. Leží v povodí Teplé Vltavy.

Husinec

Stanice Husinec se nachází v nadmořské výšce 536 m n. m. u obce Husinec v podhůří Šumavy. Průměrná roční teplota je 7,5 °C. Nejchladnějším měsícem je leden s teplotou -1 °C. Nejteplejším měsícem je červenec a srpen s průměrnou teplotou 18 °C. Průměrný úhrn srážek se pohybuje kolem 700 mm. Nejsušší měsíc z hlediska srážek je únor a nejvyšší úhrny zaznamenáváme v červenci. Stanice se nachází v povodí Blanice.

Jizerské hory

Jizerské hory jsou nejsevernějším pohořím v České republice. Leží ve Frýdlantském výběžku na hranicích s Polskem. Pohoří je pojmenováno podle řeky Jizery, která pramení na nejvyšší hoře české části pohoří Smrku (1124 m n. m.). Nejvyšší horou celého pohoří je Wysoka Kopa (1126 m n. m.). Jizerské hory byly v minulosti považovány pouze za západní výběžek Krkonoš. Střední výška je 696 m n. m.

Pohoří v dnešní podobě bylo formováno hercynským vrásněním a saxonskými třetihorními pohyby. Hlavní horninou tvořící Jizerské hory jsou granity. Najdeme zde ale i další horniny, jako jsou krystalické břidlice, mramor nebo metamorfované ortoruly. Opomenout nemůžeme ani čedičové sopečné vrcholy, jako je například Bukovec nad osadou Jizerka. Geologicky se Jizerské hory řadí pod Krkonošsko – Jesenickou subprovincii. Pohoří je charakteristické rozsáhlými náhorními plošinami, ze kterých vystupují četné žulové vrcholky ve formě mrazových srubů a také deprese, které jsou vyplněny rašeliništi. Ve čtvrtohorách došlo vlivem blízkosti kontinentálního ledovce, který se zastavil o severní okraj pohoří, k četným znakům mrazového zvětrávání, a proto můžeme pozorovat velké množství periglaciálních geomorfologických tvarů (<https://jizerskehory.ochranaprirody.cz/>).

Z hlediska hydrologie Jizerskými horami prochází rozvodí Baltského a Severního moře. Mezi důležité řeky pramenící v Jizerských horách patří Jizera, která je přítokem Labe, Kamenice, přítok Jizery a Lužická Nisa, která je přítokem Odry. Důležitým prvkem hydrologického režimu jsou rašeliniště, která mají výbornou schopnost retence vody a zpožďují jarní odtok vody z tání sněhu. V Jizerských horách se kromě rašelinných jezírek nenacházejí žádná významná jezera přírodního původu, ale je zde řada významných přehradních nádrží. Mezi největší patří Souš, Bedřichov a Josefův důl. Tyto přehrady slouží jako zdroj pitné vody pro velká města v podhůří Liberec a Jablonec nad Nisou.

Průměrná teplota se pohybuje mezi 4 a 7 °C, přičemž nejchladnější je leden a nejteplejším měsícem je červenec. Zajímavým místem z hlediska teplot je horská osada Jizerka, která leží v mrazové kotlině a často jsou zde naměřeny minimální roční teploty v celé České republice. V roce 1940 zde byla naměřena teplota -42 °C. Z hlediska srážek jsou Jizerské hory taktéž výjimečné, a to z důvodu polohy. Vlhké severozápadní proudění naráží na Jizerské hory, jako na první výraznější překážku, a proto tu měříme v České republice dlouhodobě nejvyšší úhrny srážek. Na Nové Louce u Bedřichova byl naměřen Evropský rekord v denním úhrnu srážek a to 345 mm. Na Jizerce bylo naměřeno za rok 2201 mm srážek (Nevrlý, 1981).

Bedřichov

Meteorologická stanice Bedřichov se nachází v nadmořské výšce 777 m n. m. v těsné blízkosti hráze přehrady Bedřichov v jihovýchodní části Jizerských hor. Stanice leží v povodí Černé Nisy (úmoří Baltského moře). Zajímavostí je, že se stanice nachází jen 1500 metrů od stanice Nová Louka, kde byly naměřeny rekordní srážky. Průměrná teplota na stanici je 5,3 °C. Nejchladnějším měsícem je leden (-3 °C) a nejteplejšími měsíci jsou červenec a srpen (14 °C). Roční úhrny srážek se pohybují kolem 1450 mm. Jsou zajímavé i velmi vysoké zimní srážky na stanici Bedřichov. Minima srážek nastávají v dubnu a říjnu.

Desná

Stanice Desná se nachází v nadmořské výšce 772 m n. m. u přehradní vodárenské nádrže Souš v jihovýchodní části Jizerských hor. Stanice se leží v povodí Černé Desné (úmoří Severního moře). Roční průměrná teplota je 5,3 °C. Průměrné srážky činí 1500 mm. Měsíc s nejvyššími srážkami je červenec a nejsušší je říjen.

Krkonoše

Krkonoše jsou pohoří v severovýchodních Čechách na území Královéhradeckého a Libereckého kraje a jedná se o nejvyšší pohoří České republiky a také Slezska. Nejvyšší hora Krkonoš je Sněžka s nadmořskou výškou 1603 m n. m. Střední výška pohoří je 901 m n. m. a typická je velká výšková stupňovitost. Z dvaceti nejvyšších vrcholů v České republice leží patnáct v Krkonoších.

Základ geologického složení tvoří krystalické břidlice a metamorfované svory předprvohorního stáří. Krystalinikem na některých místech proniká žulový krkonošsko-jizerský pluton. Profil Krkonoš byl mimo jiné modelován ledovci. Ve čtvrtohorách se zde

nacházely dva typy zalednění, a to údolní a ledovce skandinávského typu. Typickou ukázkou glaciální modelace jsou rozsáhlé náhorní plošiny, jako je například Labská louka, nebo hluboká údolí ve tvaru písmene U – Labský či Obří důl. Příklady kryogenní činnosti jsou například kamenná moře na svazích Vysokého Kola, nebo mrazové sruby (Polední a Mužské kameny). Krkonošský hřeben je dlouhý 35 km a táhne se od Novosvětského (888 m n. m.) do Královeckého sedla (516 m n. m.). Vrcholové partie jsou ploché a severovýchod spadají příkrými svahy do Polska. Na české straně jsou svahy mírnější a jsou rozděleny četnými dolinami jak ledovcového, tak fluviálního původu. Dělí se na Krkonošské rozsochy, Krkonošské hřbety a Vrchlabskou vrchovinu (Flousek, 2007).

Krkonoše tvoří rozvodí mezi Baltským a Severním mořem. Pramení zde například české řeky Labe, Úpa a Jizerka. Na polské straně pohoří se nacházejí dvě karová jezera Wielki a Mały Staw. Na české straně potom jen jedno periodické morénové jezero s názvem Mechové jezírko. V Krkonoších se nachází jediná přehrada, která se nachází na řece Labi na jižním okraji Špindlerova Mlýna s názvem Labská.

Průměrná teplota vzduchu se v Krkonoších pohybuje od 6 °C až do 0,2 °C na Sněžce, která je tedy nejchladnějším místem v České republice. Sněžka je také známá jako největrnější místo v ČR s poryvy až 216 km/h. I přes to, že jsou Krkonoše nejvyšším pohořím, nejsou tu měřeny nejvyšší úhrny srážek, protože leží ve srážkovém stínu Jizerských hor. V západní části je více srážek než ve východní. Na hřebenech se úhrny pohybují okolo 1300 mm/rok a v údolích je to až 1500 mm/rok. (krnap.cz)

Harrachov

Stanice Harrachov se nachází v nadmořské výšce 700 m n. m. u města Harrachov. Stanice leží v povodí Mumlavy. Průměrná teplota v Harrachově je 5,8 °C s maximem v červenci a minimem v lednu. Roční úhrn srážek se pohybuje kolem 1350 mm s maximem v červenci a minimem v říjnu.

Orlické hory

Orlické hory jsou horský celek v severovýchodních Čechách, nacházející se na hranicích s Polskem. Nejvyšším vrcholem je Velká Deštná s nadmořskou výškou 1115 m n. m. Název je odvozen od řeky Orlice, která zde pramení a protéká po česko-polské hranici.

Základ geologické stavby pohoří tvoří staré metamorfované horniny, jako je rula, svor a fylit. Během hercynského vrásnění došlo k průniku granitoidních těles. V období křídý bylo pokleslé území zalito mořem a vznikly tak oblasti s vápencem. Během saxonských pohybů bylo pohoří znovu vyvrásněno. Ve čtvrtohorách probíhalo na hřebenech výrazné mrazové zvětrávání a došlo ke vzniku mrazových srubů a kamenných moří. V Orlických horách vzhledem ke stáří a zarovnávání reliéfu spíše oblé vrcholky a ploché hřebenové partie. Pohoří měří na délku 55 km a jeho šířka se pohybuje mezi 5 a 8 km. Pohoří patří do krkonošsko-jesenické soustavy (Balatka, 2006).

Orlické hory tvoří přirozené rozvodí mezi Severním (ne českou stranu) a Baltským mořem. Nejvýznamnějším tokem oblasti je Divoká Orlice, pramenící na svazích Zbojnické Gory na polském území asi dva kilometry od hranic. Poté teče podél Orlických hor na jihovýchod, kde se stáčí prudce na jihozápad a proráží horský hřbet hlubokou soutěskou zvanou Zemská brána. Mezi další řeky v oblasti se řadí Zdobnice, Říčka a Bělá. Nenacházíme zde žádná významná jezera přírodního původu. Jedinou významnou akumulací povrchových vod je přehradní nádrž Pastviny na Divoké Orlici.

Klimaticky patří většina území Orlických hor do chladné oblasti. Nejchladnějším měsícem je leden, nejteplejším červenec. Na hřebenech dosahují průměrné roční teploty hodnot kolem 4 °C. V nejteplejším měsíci se průměrná teplota pohybuje okolo 13 °C, v nejchladnějším měsíci je průměr -2 °C. Nejvyšší měsíční úhrny srážek se objevují v červenci a srpnu vlivem letních bouřkových srážek, ale v letech (1991, 1992) v listopadu i prosinci. Průměrný roční úhrn se pohybuje v nižších oblastech kolem 700-800 mm. Ve vyšších partiích Orlických hor se pohybuje okolo 1 300 mm. (<http://orlickehory.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko/>)

Deštné v Orlických horách

Stanice Deštné se nachází v nadmořské výšce 656 m n. m. v povodí řeky Bělé. Průměrná teplota na stanici je 6,2 °C s maximem v červenci a minimem v lednu. Z hlediska srážek je průměrný úhrn 1050 mm s maximem v srpnu a minimem v březnu. (<http://orlickehory.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko/>)

Rokytnice v Orlických horách

Stanice Rokytnice se nachází v nadmořské výšce 577 m n. m. v povodí řeky Rokytenky. Průměrná teplota na stanici je 7 °C s maximem v červenci a minimem v lednu. Průměrný roční průměr srážek je 900 mm s maximem v červenci a minimem v březnu. (<http://orlickehory.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko/>)

Moravskoslezské Beskydy

Moravskoslezské Beskydy se rozkládají ve východní části České republiky na hranicích se Slovenskou republikou a z části také Polskem. Nejvyšší horou je Lysá hora s nadmořskou výškou 1323 m n. m. Pohoří je součástí Vnějších západních Karpat a řadí se mezi mladší pohoří v ČR.

Beskydy jsou součástí flyšového pásma Karpat, které patří do soustavy mladých pásemných pohoří. Vznikly koncem druhohor a ve třetihorách vyvrásněním z usazenin moře, nazývaného Tethys. Stavba karpatského flyše vznikla vlivem horotvorných pohybů alpínského vrásnění. Flyšové usazeniny vytvořily velké příkrovy, které se přesouvali přes sebe, a to převážně severním směrem. Poté se uplatňovaly především pohyby podél zlomů. K tektonickým pohybům dochází i ve čtvrtohorách. Charakteristickou horninou Karpat jsou mocné vrstvy sedimentárních hornin, jako je pískovec nebo prachovec (Balatka, 2006).

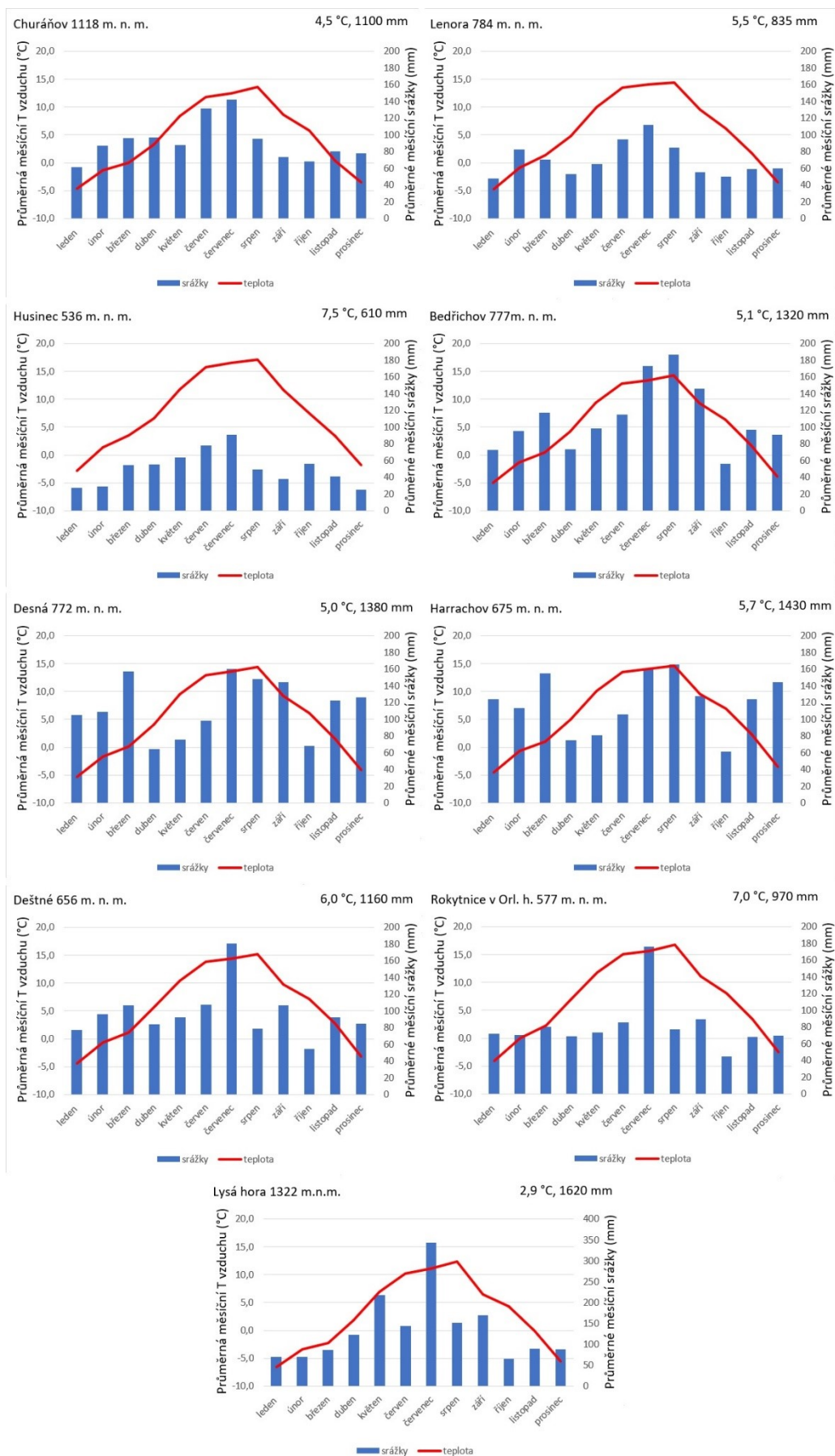
Geomorfologické členění je poměrně složité. Na našem území se nachází hned několik geomorfologických celků: Moravskoslezské Beskydy, Hostýnsko-Vsetínská hornatina, Javorníky, Rožnovská brázda, Jablunkovská brázda a Podbeskydská pahorkatina. Pro Beskydy je charakteristická velká relativní výšková členitost, kdy jsou hory odděleny hlubokými údolími. Říční síť a její geneze je dalším charakteristickým prvkem tohoto pohoří. Zdejší typ divočících šterkonosných toků, na který jsou vázány vzácné druhy rostlin a živočichů v rámci celé republiky nikde jinde nenajdeme. Celá oblast obsahuje přirozené

akumulace vod. Patří mezi vydatné a kvalitní zdroje pitné vody v ČR. Oblastí prochází rozvodí Baltského a Černého moře. Mezi přítoky Odry patří například Ostravice a Olše. Přítoky Moravy jsou hlavně Bečva (Vsetínská a Rožnovská). Oblast je chudá na podzemní vody kvůli špatně propustným horninám.

Nejnižší teploty má Lysá hora, průměrně 2,9 °C a nejnižše položené oblasti mají teplotní průměr okolo 7 °C. Měsícem s nejnižší průměrnou teplotou je leden a nejteplejší teploty jsou zde pozorovány v červenci. Na nadmořské výšce je závislý i další klimatický faktor a to srážky. Lysá hora patří s průměrem 1400 mm/rok k srážkově nejbohatším místům na území celé České republiky. Nejvíce srážek spadne v letním období a nejméně v únoru a březnu. Významnou složkou ročních úhrnů srážek je sníh. Průměrná délka souvislé sněhové pokrývky je ve vrcholových partiích 150 až 180 dní (<http://beskydy.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/>).

Lysá hora

Stanice Lysá hora se nachází v nadmořské výšce 1322 m n. m. na vrcholu stejnojmenného vrcholu. Průměrná teplota činí 2,9 °C a průměrný úhrn srážek je 1620 mm. Leží na rozvodí řek Ostravice a Mohelnice.



Obr. 8 – Klimadiagramy stanic zkoumaných v praktické části

4.2. - Výběr stanic, zkoumaného období a použitých dat

Pro výzkum trendů v parametrech sněhové pokrývky bylo zvoleno devět stanic, které pokrývají hlavní česká pohoří, konkrétně Šumavu, Jizerské hory, Krkonoše, Orlické hory a Moravskoslezské Beskydy. Pokryt byl poměrně velký rozsah nadmořských výšek (536–1322 m n. m.). Pro sledování trendů bylo zvoleno období hydrologických roků 1980-2014, přičemž výjimku tvoří stanice Harrachov, kdy časová řada končí již v roce 2012.

Pro výzkum byla použita data ze sítě Českého hydrometeorologického ústavu. Denní chod měla data průměrná denní teplota vzduchu, úhrn srážek a celková výška sněhové pokrývky. Dále byla k dispozici data vodní hodnoty sněhu (SWE) s týdenním chodem měření. Z tohoto důvodu pravděpodobně nebyla zastižena maximální roční hodnota SWE zcela přesně. V datech byly pomocí korelací doplněny některé kratší výpadky (maximálně jeden měsíc).

Zpracování klimatických a sněhových dat probíhalo v programu Microsoft Excel a pro výpočet Mann-Kendall trendů program Makesens 1.0. Pro vytvoření mapových prvků bylo použito softwaru ArcGIS 10.3 od firmy ESRI. Mapové vrstvy byly vytvořeny pomocí WMS služby z mapových serverů Národního portálu INSPIRE.

Hlavní zkoumané parametry jsou průměrná roční teplota, průměrná měsíční teplota v chladné části roku, roční a měsíční úhrn srážek, průměrná výška sněhové pokrývky, maximální výška sněhové pokrývky, maximální hodnota SWE, počet dní se sněhem, datum tání sněhové pokrývky a poměr sněhových srážek ke srážkám celkovým (snowfall-fraction).

4.3. - Metodika zpracování dat

Metodika zpracování průměrné roční (měsíční) teploty vzduchu

Pro každý hydrologický rok (1.11. – 31.10.) byly vybrány průměrné denní teploty vzduchu a ty byly zprůměrovány. Tímto způsobem lze porovnat jednotlivé roky z hlediska teplot. Na roční data byl dále aplikován Mann-Kendall test pro odhalení případného trendu. Pro tento parametr byly počítány také měsíční trendy.

Metodika zpracování ročního úhrnu srážek

Pro každý hydrologický rok (1.11. – 31.10.) byly vybrány kladné nenulové hodnoty úhrnu srážek a ty byly sečteny. Tímto způsobem lze porovnat jednotlivé roky z hlediska srážek. Na roční data byl dále aplikován Mann-Kendall test pro odhalení případného trendu.

Metodika zpracování průměrné výšky sněhu

Pro každý hydrologický rok (1.11. – 31.10.) byly vybrány kladné nenulové hodnoty výšky sněhu a ty byly zprůměrovány. Tímto způsobem lze porovnat jednotlivé roky z hlediska množství sněhu. Na roční data byl dále aplikován Mann-Kendall test pro odhalení případného trendu ve vývoji průměrné výšky sněhové pokrývky. Pro tento parametr byly počítány také měsíční trendy.

Metodika zpracování maximální výšky sněhu

V datech výšky sněhové pokrývky pro každý hydrologický rok byly hledány pomocí funkce MAX maximální hodnoty. Na roční data byl dále aplikován Mann-Kendall test pro odhalení případného trendu ve vývoji maximální výšky sněhové pokrývky.

Metodika zpracování maximální hodnoty SWE

Maximální hodnoty SWE byly hledány stejným způsobem, jako hodnoty maximální výšky sněhové pokrývky. Je nutné si uvědomit, že hodnoty SWE byly měřeny většinou jen jednou týdně, a tudíž tyto hodnoty nemusí přesně odpovídat realitě. Na některých stanicích se při maximálních výškách sněhu měření provádělo i několikrát za týden, kvůli zpřesnění dat.

Metodika zpracování počtu dní se sněhem

Počet dní se sněhem byl zjištěn pomocí funkce COUNTIF, kdy program počítá počet polí s kladnou hodnotou výšky sněhové pokrývky. Na tato data lze znovu aplikovat Mann-Kendall test.

Metodika zpracování dat roztátí sněhové pokrývky

Bylo hledáno datum, kde se v datech objevila první nulová hodnota výšky sněhu po maximu výšky sněhové pokrývky. Toto datum bylo převedeno na číslo dne v hydrologickém roce kvůli možnosti dalšího zpracování, které by ve formátu datum nebylo možné. Na tato data lze znovu aplikovat Mann-Kendall test.

Metodika zpracování dat poměru sněhových a celkových srážek (snowfall fraction)

Pro zpracování tohoto parametru byla využita standartně používaná prahová hodnota 1 °C jako hranice mezi sněžením a deštěm. Například Würzer (2017) tuto hranici výskytu dešťových srážek nastavuje na 1,2 °C, přičemž při teplotách mezi 0,7 a 1,7 °C se podle něj většinou vyskytují srážky smíšené. Sněhové srážky byly vybrány pomocí funkce IFS, která vybrala z dat úhrnu srážek ty, ke kterým došlo při teplotě pod 1 °C. Hodnoty sněhových srážek byly sečteny a poté vyděleny celkovými srážkami za daný hydrologický rok. Výšlé hodnoty označují, kolik procent srážek spadlo ve formě sněhu v daný rok. Na výsledná data se aplikuje Mann-Kendall test. Pro tento parametr byly počítány také měsíční trendy.

4.4. - Metodika hodnocení trendů pomocí Mann-Kendall testu

Mann-Kendall test je široce využívaný statistický nástroj pro hodnocení přítomnosti trendů v datových řadách. Účelem testu je zjistit, zda se na dané časové řadě dat vyskytuje kladný, nebo záporný trend. Kladný (záporný) trend znamená, že se parametr v čase zvyšuje (snižuje). Test zkoumá, zda lze vyvrátit nulovou hypotézu H_0 na určité hladině významnosti. V této práci byla použita nulová hypotéza, že se na datové řadě nenachází žádný trend.

Výsledná roční data z výpočtu parametrů sněhové pokrývky byla podrobena výpočtu přítomnosti statického trendu v programu Makesens 1.0. Za významný trend se pro 95% interval spolehlivosti dá považovat výsledek s p-hodnotou nižší, než 0,05. Hodnota p poté určuje, zda je trend kladný, nebo záporný a také jak rychlý nebo pomalý jeho vývoj (vyjadřuje odhad změny parametru za jednu časovou jednotku (v tomto případě tedy jeden rok). Důležitá byla také hodnota Q, která vyšla z výpočtu lineárního trendu Sen's slope. Vyjadřuje o kolik se průměrně mění hodnota za časovou jednotku. Tato hodnoty byla použita pro údaje o rychlosti vývoje parametrů za dekádu (10 let) (Hirsch et. al, 1982)

V této práci jsou využity hladiny významnosti 10 %, 5 %, 1 % a 0,1 % odpovídající intervalům spolehlivosti 90 %, 95 %, 99 % a 99,9 %.

5. Výsledky

5.1. - Vývoj klimatických faktorů souvisejících se sněhovou pokrývkou

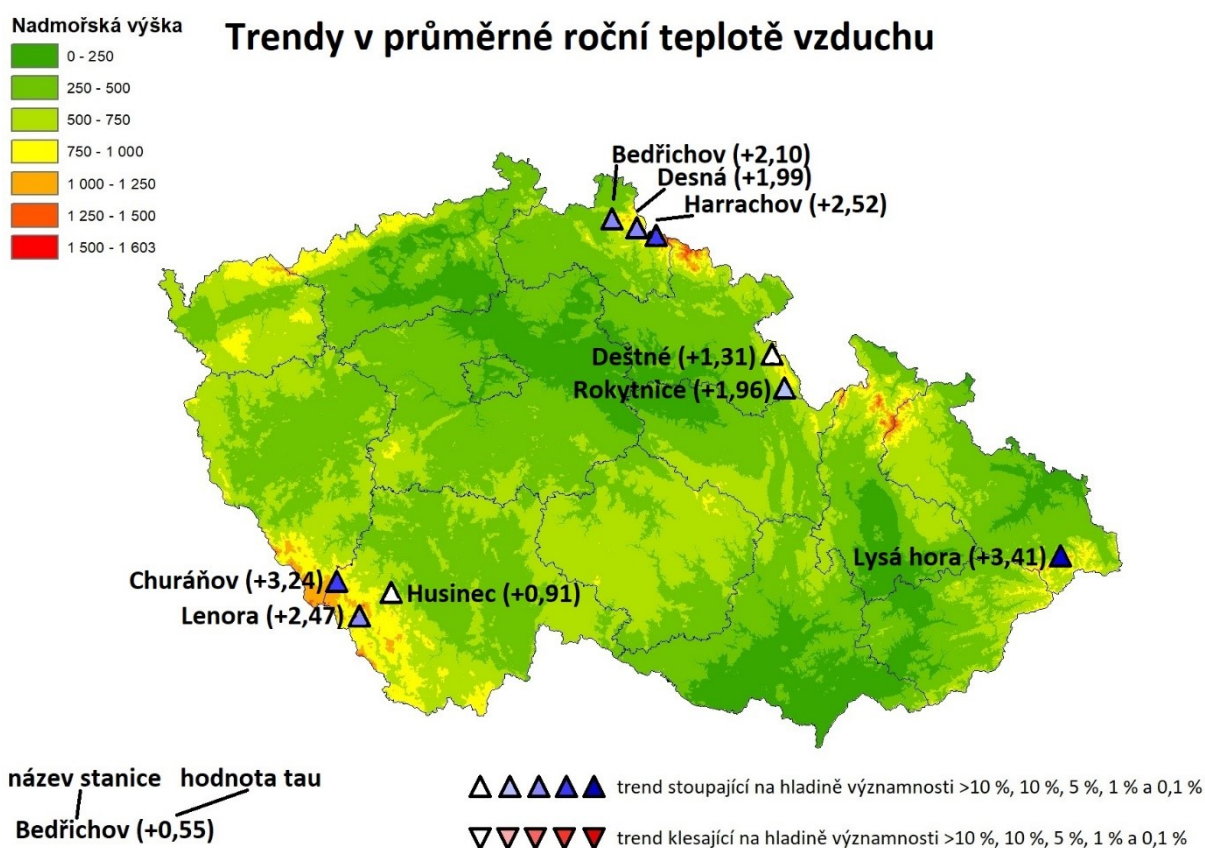
Průměrná roční teplota vzduchu (T_{avg})

Průměrná roční teplota vzduchu roste v souvislosti s globálním oteplováním na všech místech České republiky a v tomto parametru bylo nalezeno i nejvíce prokazatelných trendů. Průměrná teplota je parametr, který vykazuje vysokou závislost na nadmořské výšce. Nejvyšší průměrná teplota byla zjištěna na stanici Husinec, která leží v nadmořské výšce 536 m n. m. a průměrná roční teplota v období hydrologických roků 1980-2014 činila 7,5 °C. Naopak stanice Lysá hora, která je ze zkoumaných stanic v nejvyšší nadmořské výšce měla průměrnou teplotu jen 2,9 °C. Vzhledem k relativně malé rozloze České republiky je dobře viditelná podobnost tvaru grafů, což znamená, že když byl na území ČR teplejší, nebo chladnější rok, projevílo se to více, či méně na všech stanicích. Velkou odchylku poté tvoří rok 1981 na stanici Deštné, který se výrazně liší od normálu a na jiných stanicích se tyto odchylky tímto způsobem neprojevují. Tyto anomálie se nepodařilo nijak vysvětlit a z dat se nezdá, že by se zde objevila například chyba měření. Vyzdvihnout lze také hydrologický rok 1996, kdy se ale nízká průměrná teplota projevila na všech stanicích bez výjimky. Naopak nadprůměrně teplé byly roky 1983, 2007 a 2014 a to také téměř na všech stanicích, kdy se teploty od lineární spojnice trendu lišily až o 1 °C. Z hodnot tau se zdá, že se průměrná teplota zvyšuje rychleji ve vyšší nadmořské výšce, protože u stanic Churáňov (+0,43 °C za deset let), Lysá hora (+0,45 °C), Desná (+0,29 °C) a Bedřichov (+0,36 °C), což jsou stanice nad 700 m n. m. je zvyšování rychlejší, než například v Husinci (+0,15 °C), nebo Rokytnici v Orlických horách (+0,25 °C) přičemž se obě stanice v nadmořské výšce do 600 m n. m.

Trendy v průměrné teplotě se prokázaly pomocí výsledků Mann-Kendall testu na hladině významnosti 10 % u stanice Rokytnice v Orlických horách, na hladině 5 % u stanic Lenora, Bedřichov a Desná, na hladině 1 % u stanice Churáňov a na hladině 0,1 % na stanici Lysá hora. Ve všech případech byly trendy kladné, což znamená, že se průměrná teplota zvyšuje.

Průměrná měsíční teplota vzduchu

V průměrných teplotách vzduchu jsou trendy významné zejména v listopadu a dubnu. V listopadu nacházíme převážně trendy na 5 % hladině významnosti, přičemž vybočuje stanice Lenora, kde je hladina významnosti 10 % a stanice Husinec, kde se významný trend neobjevil. V měsíci dubnu jsou na všech stanicích trendy velice významné (hladina významnosti 1 % a 0,1 %). Silnější trendy znovu nacházíme na stanicích s vyšší nadmořskou výškou (Churáňov a Lysá hora). Na Churáňově se trend objevil navíc ještě v květnu (10 %). Zajímavé jsou také měsíce prosinec, kde se na některých stanicích vyskytují také slabé klesající trendy, a březen, kde byly trendy stoupající jen velice slabě.



Obr. 9- Mapa trendů průměrné roční teploty na stanicích

T avg	listopad		prosinec		leden		únor		březen		duben		květen	
název stanice	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau
Churáňov	5%	2,22	-	0,26	-	0,71	-	0,71	-	0,74	0,10%	3,66	10%	1,76
Lenora	10%	1,90	-	0,03	-	1,14	-	1,22	-	0,34	1%	3,21	-	1,02
Husinec	-	1,45	-	-0,55	-	0,85	-	0,65	-	0,00	1%	3,10	-	0,06
Bedřichov	5%	2,47	-	0,31	-	0,26	-	0,74	-	0,31	1%	3,07	-	0,48
Desná	5%	2,07	-	-0,26	-	0,14	-	0,65	-	0,11	1%	2,78	-	0,74
Harrachov	5%	2,19	-	-0,06	-	0,54	-	0,91	-	0,31	1%	3,07	-	0,91
Deštné	5%	2,24	-	-0,21	-	0,34	-	0,51	-	0,03	1%	2,67	-	-0,09
Rokytnice	5%	2,10	-	-0,26	-	0,43	-	0,57	-	0,17	1%	2,80	-	0,06
Lysá hora	5%	2,56	-	0,34	-	0,31	-	0,40	-	0,06	0,10%	3,78	-	0,82

Obr. 10– Tabulka měsíčních trendů průměrné teploty vzduchu

Roční úhrn srážek (P roční)

Stejně jako průměrná roční teplota je i roční úhrn parametr závisící na nadmořské výšce. S rostoucí nadmořskou výškou se srážkové úhrny zvyšují. Na rozdíl od teploty se ale přidávají i další faktory, jako je poloha na návětrné (zavětrné) straně hor, tvar reliéfu, převládající směr proudění atd. Proto lze pozorovat podobnost tvaru grafů většinou jen v rámci jednoho pohoří, ale i v rámci pohoří lze pozorovat celkem vysokou variabilitu. Nejvyšší srážkové úhrny lze pozorovat na stanicích v Jizerských horách (Bedřichov a Desná), kde jsou roční srážkové úhrny dlouhodobě nejvyšší v rámci ČR a Lysé hoře, která také leží na návětrné straně Moravskoslezských Beskyd. Například na Šumavě byl extrémně srážkově bohatý rok 2002, na čemž měly velký podíl srpnové srážky, které způsobily extrémní povodně. Na ostatních stanicích se tento rok tak výrazně neprojevoval. Jako další nadprůměrně vlhké roky se dají zmínit roky 1981 (Jizerské hory a Krkonoše), 1995 (všechny stanice) a 2010 (Bedřichov a Lysá hora). Jako nejsušší rok se na téměř všech stanicích projevuje rok 2003. Suché byly také roky 1985 a 1991.

V ročních úhrnech srážek se žádné významné trendy prokázat nepodařilo. Sklony spojnic jsou malé a na některých stanicích jsou kladné a na některých záporné. Trendy se kvůli velké meziroční variabilitě nedají příliš dobře charakterizovat lineární spojnici. Je tedy vidět, že změny sněhové pokrývky pravděpodobně nebudou následkem snižování úhrnů srážek, ale budou spíše souviset se zvyšováním teplot. Jediná stanice, která se trendu na 10 % hladině významnosti přiblížila je stanice Deštné, kde byl pokles o něco výraznější (-36 mm za dekádu).



Obr. 11- Roční úhrny srážek na stanicích (v mm)

Poměr sněhových srážek k celkovým (snowfall fraction, S/P)

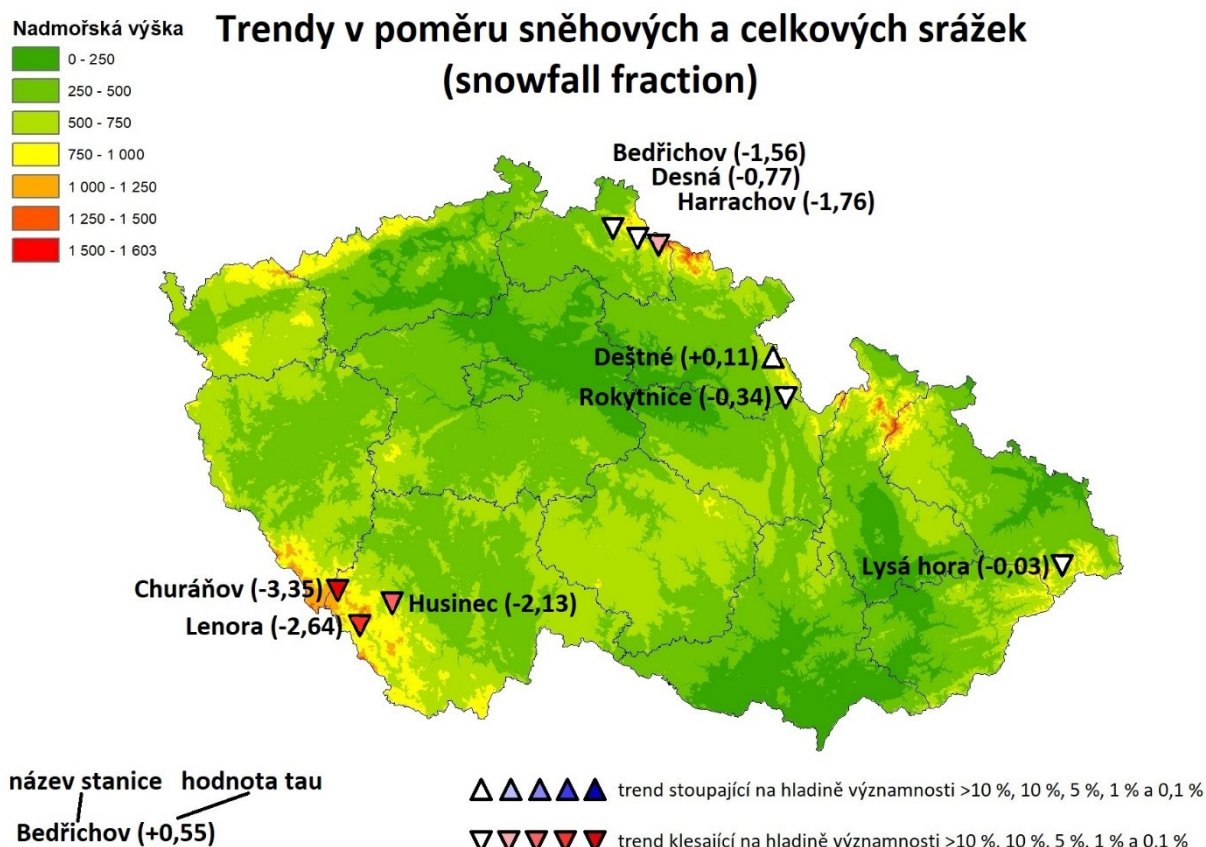
Tento parametr závisí na množství sněhových srážek, ale nevypovídá zcela dokonale o stavu sněhových srážek v daném hydrologickém roce, protože pokud jsou vysoké úhrny v teplé části roku, tak se hodnota snowfall fraction snižuje i pokud byla zima bohatá na sněhové srážky. Vysokou hodnotou lze kromě srážkově bohaté zimy vyložit i jako rok se suchým létem a podobně. Hodnota silně závisí na nadmořské výšce, teplotě a distribuci srážek během roku. Nejvyšší hodnoty nacházíme na stanicích Churáňov, Bedřichov, Desná a Lysá hora. Na těchto stanicích dosahuje poměr hodnot až nad 50 %. To znamená, že přes polovinu úhrnu srážek v daném hydrologickém roce tvořily srážky sněhové. Zajímavé jsou tato vysoká čísla na stanicích Bedřichov a Desná, které leží v poměrně nízké nadmořské výšce. Na těchto stanicích jsou ale dlouhodobě pozorovány nadprůměrné zimní srážky. Je nutné zmínit, že tento parametr vykazuje na všech stanicích velkou meziroční variabilitu. Jako lokální minima se ukazují například roky 1997, 1998, 2001 a zejména rok 2014, který byl obecně z hlediska sněhu velice slabý a například na stanici Husinec vyšla hodnota pouze 2 %. Lokální maxima tohoto parametru jsou zejména roky 1982, 1992, 2006 a v Orlických horách a na Lysé hoře i rok 2009.

Z hlediska trendů lze na všech stanicích pozorovat pomalý pokles, který ale na většině stanic nebyl prokázán Mann-Kendall testem. Podobně jako u srážek je zde obtížné trendy charakterizovat lineárním trendem (nízké hodnoty R^2 – hodnoty spolehlivosti). Průkazné trendy se projevíly pouze na šumavských stanicích. Na hladině významnosti 1 % na stanicích Churáňov (-4 % za dekádu) a Lenora (-2 %) a na hladině významnosti 5 % na stanici Husinec (-2 %). Proč se tyto trendy projevují jen na Šumavě není jisté, ale mohlo by to souviset s polohou v nižší zeměpisné šířce.

Trendy v měsíčních hodnotách snowfall fraction

Podobně jako u teplot se zde trendy vyskytovaly zejména na začátku a konci období se sněhem, tedy měsíců listopad a duben. Rozdíl je zde v měsíci únor, kdy zde pozorujeme také silněji klesající trendy. V listopadu pozorujeme významné klesající trendy na hladině významnosti na stanicích Husinec a Lysá hora, v únoru na stejné hladině na stanicích Churáňov a Desná. V dubnu poté pozorujeme velice významné trendy (1 % a 0,1 %) na všech stanicích s výjimkou Husince a Rokytnice v Orlických horách. U těchto stanic se trend očekávat nedal, protože zde již v dubnu vlivem celkem nízké nadmořské výšky obvykle nesneží a nelze tak čekat nějaké změny v tomto parametru. Slabší trend se v dubnu objevuje

i v Harrachově, kde jsme ale měli kratší časovou řadu a přišli jsme o roky 2013 a 2014, které by podle mého názoru klesající trend ještě zesílily. Tento údaj je tedy nutné brát s rezervou. V květnu nebylo možné trendy vypočítat na většině stanic kvůli velice nízkým (nebo žádným) hodnotám z důvodu absence sněhových srážek v tomto období.



Obr. 12- Mapa trendů poměru sněhových a celkových srážek

S/P	listopad		prosinec		leden		únor		březen		duben		květen	
název stanice	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau
Churáňov	-	-1,11	-	0,97	-	-0,73	5%	-2,09	-	-1,34	0,10%	-4,15	-	-1,28
Lenora	-	-1,08	-	1,05	-	0,00	-	-0,71	-	-0,85	1%	-3,00	-	-
Husinec	5%	-2,30	-	0,10	-	-0,51	-	-0,47	-	-1,08	-	-1,26	-	-
Bedřichov	-	-1,35	-	0,33	-	-0,93	-	-1,29	-	-0,98	1%	-3,18	-	-
Desná	-	-1,58	-	0,97	-	-0,39	5%	-2,03	-	-0,61	1%	-3,00	-	-
Harrachov	-	0,03	-	0,73	-	0,87	-	-0,19	-	0,07	5%	-2,46	-	-
Deštné	-	-0,44	-	0,70	-	-0,28	-	-1,10	-	0,00	1%	-2,66	-	-
Rokytnice	-	-1,42	-	0,88	-	-1,11	-	-1,25	-	-0,10	-	-0,76	-	-
Lysá hora	5%	-2,25	-	-0,24	-	-0,97	-	0,07	-	-0,31	0,10%	-4,01	-	-1,52

Obr. 13 – Tabulka měsíčních trendů v poměru sněhových a celkových srážek

5.2. - Vývoj parametrů sněhové pokrývky

Průměrná výška sněhové pokrývky (SCEavg)

Tento parametr vznikl zprůměrováním nenulových výšek sněhové pokrývky za celý hydrologický rok. Ukazuje množství sněhu v průběhu celého zimního období a lze tedy porovnávat zimy z hlediska výšky sněhové pokrývky. Tento parametr ale nebere v úvahu počet dnů se sněhem, tudíž kratší intervaly se sněhem na podzim a později na jaře tuto hodnotu spíše snižují, což je značná nevýhoda. Pro krátkou zimu s vysokou sněhovou pokrývkou tedy vyjde hodnota vyšší než pro zimu s delším trváním sněhové pokrývky, ale nižší výškou. Zimy, kdy průměr přesáhl 100 cm jsou kromě stanice Lysá hora (maximum <150 cm v roce 2006), kde tato situace nastává poměrně často, poměrně vzácné a vyskytly se ještě na stanicích Bedřichov (1987 a 2006), Desná (1987 a 2006) a Harrachov (1987). Churáňov takových hodnot i přes svou vysokou nadmořskou výšku nedosahuje (maximum 90 cm v roce 1987). Roky 1987 a 2006 se zde objevují opakovaně a je tedy možné tvrdit, že se jednalo o roky s nejvyšší průměrnou sněhovou pokrývkou v horských oblastech ČR. Pokud se podíváme na opačný konec spektra vynikají zde roky 1989, 1990, 1991, 1998, 2007, 2008 a zejména rok 2014, kdy byla průměrná výška sněhu silně podprůměrná.

V průměrné výšce sněhové pokrývky žádné významné trendy nalezeny nebyly. Na některých stanicích byl dokonce zaznamenán kladný sklon lineární spojnice, což ale přisuzuji spíše roku 2006, kdy byla výška pokrývky na všech stanicích silně nadprůměrná. Stanice, kde se projevil pokles o něco významnější byl Churáňov (-3,5 cm/10 let), kde je vzhledem k nadmořské výšce sněhu stále podprůměrné množství. To se dá přisoudit poloze na závětrné straně Šumavy a tím pádem i nižším úhrnům srážek. Podobný vývoj je i na stanici Deštné (-3,6 cm/10 let), kde období chudší na sníh trvá již od roku 2007 s výjimkou roku 2012. Taková změna bude nejspíše způsobena výrazným zvyšováním teploty vzduchu.

Měsíční trendy v průměrné výšce sněhu

Na úrovni měsíců je již situace zajímavější a na konci období se sněhem (březen, duben a květen) se zde podařilo několik prokazatelných trendů najít. Všechny významné trendy byly klesající. V březnu byl trend na hladině významnosti 10 % nalezen na nízko položené stanici Husinec. V dubnu na hladině 5 % na stanicích Lenora a Husinec. Na hladině 10 % poté na stanici Bedřichov. V květnu na vysoko položených stanicích Churáňov (1 %)

a Lysá hora (5 %). V květnu nebylo možné trendy vypočítat na většině stanic kvůli velice nízkým (nebo žádným) datům.

SCE avg	listopad		prosinec		leden		únor		březen		duben		květen	
název stanice	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau	trend	tau
Churáňov	-	-0,70	-	0,11	-	-0,68	-	-1,16	-	-1,08	-	-1,55	1%	-2,66
Lenora	-	-0,60	-	0,98	-	-0,20	-	-0,03	-	0,71	5%	-2,19	-	-
Husinec	-	-1,45	-	-0,91	-	0,60	-	0,38	10%	-1,78	5%	-2,57	-	-
Bedřichov	-	-0,45	-	0,92	-	0,28	-	0,31	-	-0,09	10%	-1,79	-	-
Desná	-	-0,51	-	0,36	-	-0,31	-	-0,57	-	-0,62	-	-0,64	-	-
Harrachov	-	0,28	-	0,02	-	-0,05	-	-0,33	-	-0,11	-	-0,56	-	-
Deštné	-	0,00	-	-0,40	-	-1,11	-	-1,04	-	-0,62	-	-1,11	-	-
Rokytnice	-	0,25	-	-0,31	-	-0,70	-	-0,62	-	0,28	-	-0,66	-	-
Lysá hora	-	-0,77	-	-0,16	-	-1,16	-	-1,53	-	-0,80	-	-0,75	5%	-2,51

Obr.14 – Tabulka měsíčních trendů v průměrné výšce sněhové pokrývky

Maximální výška sněhové pokrývky (SCEmax)

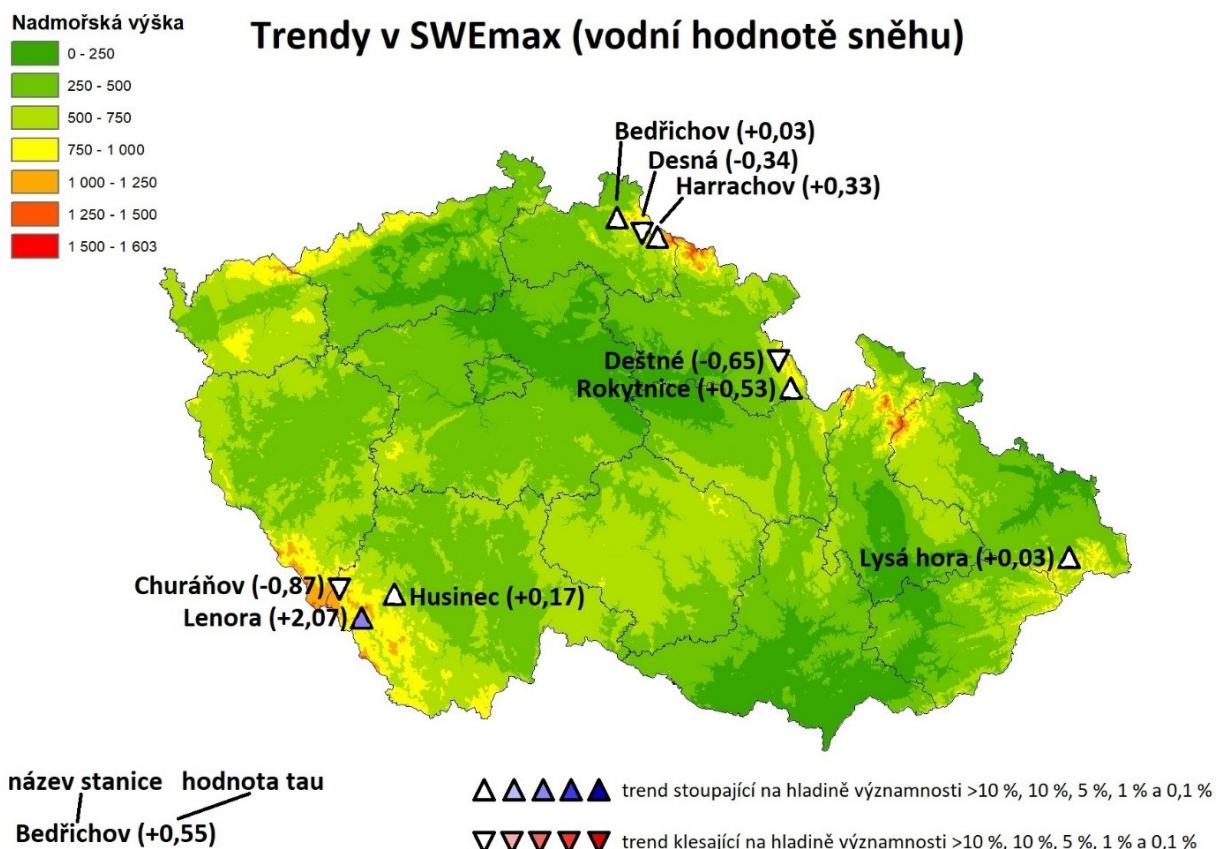
Maximální výška sněhu je parametr, který pomáhá určit množství sněhu v horách za danou zimu. Maximální výška sněhu závisí zejména na nadmořské výšce a úhrnech srážek v chladné polovině. Pokud nedochází k oblevám a úhrny sněhových srážek jsou vysoké, dochází k akumulaci silnější vrstvy sněhu. Na stanicích s vyšší nadmořskou výškou se maxima vyskytovala většinou v druhé polovině února až první polovině března. Výjimkou nejsou ani maxima na konci března/ začátku dubna. V těchto případech často dochází vlivem vyšších teplot vzduchu, nebo dešťových srážek na sněhovou pokrývku k rychlému tání sněhu a může poté docházet k vzestupu hladin toků (vznik jarních povodní). U stanic v nižší nadmořské výšce se maxima vyskytovala kdykoliv během zimy, v několika případech ještě v prosinci. Na stanicích Lenora, Husinec a Rokytnice v O. h. ve výjimečných případech dokonce v listopadu. Maximální výška sněhové pokrývky nad 250 cm se vyskytla jen na Lysé hoře, a to v letech 2005 (300 cm) a 2009 (271 cm). Nad maximální výšku 200 cm se dostávají stanice Churáňov (1988), Bedřichov (2005, 2006), Desná (1988, 2005, 2012) a na Lysé hoře se sněhová pokrývka přes dva metry dostala hned v několika případech. Za období 1980-2014 celkem v devíti případech (naposledy ovšem v roce 2009). Jako sněhově nejchudší se opět projevují roky 1990, 1994, 1998, 2007, 2008 a zejména rok 2014. V roce 2014 bylo maximum sněhové pokrývky na všech stanicích po jedním metrem. Maximum z tohoto hydrologického roku je ze stanice Lysá hora, kde bylo 10. prosince 2013 naměřeno 70 cm sněhu).

Mann-Kendall test nepotvrdil v datech maximální výšky sněhové pokrývky žádný významný trend. Na šumavských stanicích byl sklon trendu záporný, stejně jako na stanicích Desná, Deštné a Lysá hora. Na ostatních stanicích byl sklon kladný. Jediný významnější vývoj je možné pozorovat na stanicích Churáňov (-12 cm/10 let) a Lysá hora (-12 cm/10 let), kde byl pokles poměrně významný. Tyto stanice jsou dvě nejvýše položené a je proto možné uvažovat o skutečnosti, že ve vyšších nadmořských výškách je vývoj maximální výšky sněhové pokrývky o něco rychlejší než v nižších polohách.

Maximální roční hodnota sněhu (SWE max)

Vodní hodnota (snow water equivalent) je parametr, který v podstatě vyjadřuje kolik milimetrů srážek je uloženo ve sněhové pokrývce. Z tohoto pohledu se jedná o klíčový parametr pro odhad množství vody ve sněhu, čehož se dá využít pro správu přehradních nádrží (je možné odhadnout kolik vody přiteče při jarním tání sněhu), odhad jarního odtoku v horských tocích, výpočet zatížení střech a větví stromů atd. Vodní hodnota je pro určení hydrologického potenciálu sněhu významnější parametr než výška sněhové pokrývky, protože půl metru zralého mokrého sněhu může obsahovat výrazně více vody než metr čerstvého prachového sněhu při nízkých teplotách vzduchu. I přesto je vodní hodnota sněhu na výšce sněhové pokrývky silně závislá a maxima většinou pozorujeme v podobný čas. V hodnotách SWE jsou mezi stanicemi výrazné rozdíly, a to i v rámci jednoho pohoří. Nejvyšší hodnoty SWE se dlouhodobě vyskytují na Lysé hoře (několikrát i přes 500 mm) a na stanici Desná (v roce 2012 přes 700 mm). Vysoké hodnoty můžeme pozorovat také na stanicích Bedřichov (2012 přes 600 mm) a Harrachov. V porovnání s ostatními stanicemi jsou zajímavá data ze stanice Lenora, kde jsou hodnoty SWE kromě období 1999-2006 velice nízké, a to i přes celkem průměrné výšky sněhové pokrývky.

Významný stoupající trend na hladině významnosti 5 % v hodnotách SWE se vyskytl jen právě na stanici Lenora (+15,7 mm/10 let), kde lze trend vypočítat i ze spojnice lineárního trendu v grafu. Kladný sklon se vyskytl na všech stanicích s výjimkou Churáňova, Desné a Deštného. Ve všech případech kromě Lenory, Churáňova a Deštného však šlo o sklony malé, a tak se dá předpokládat, že se zde větší změny nedějí.

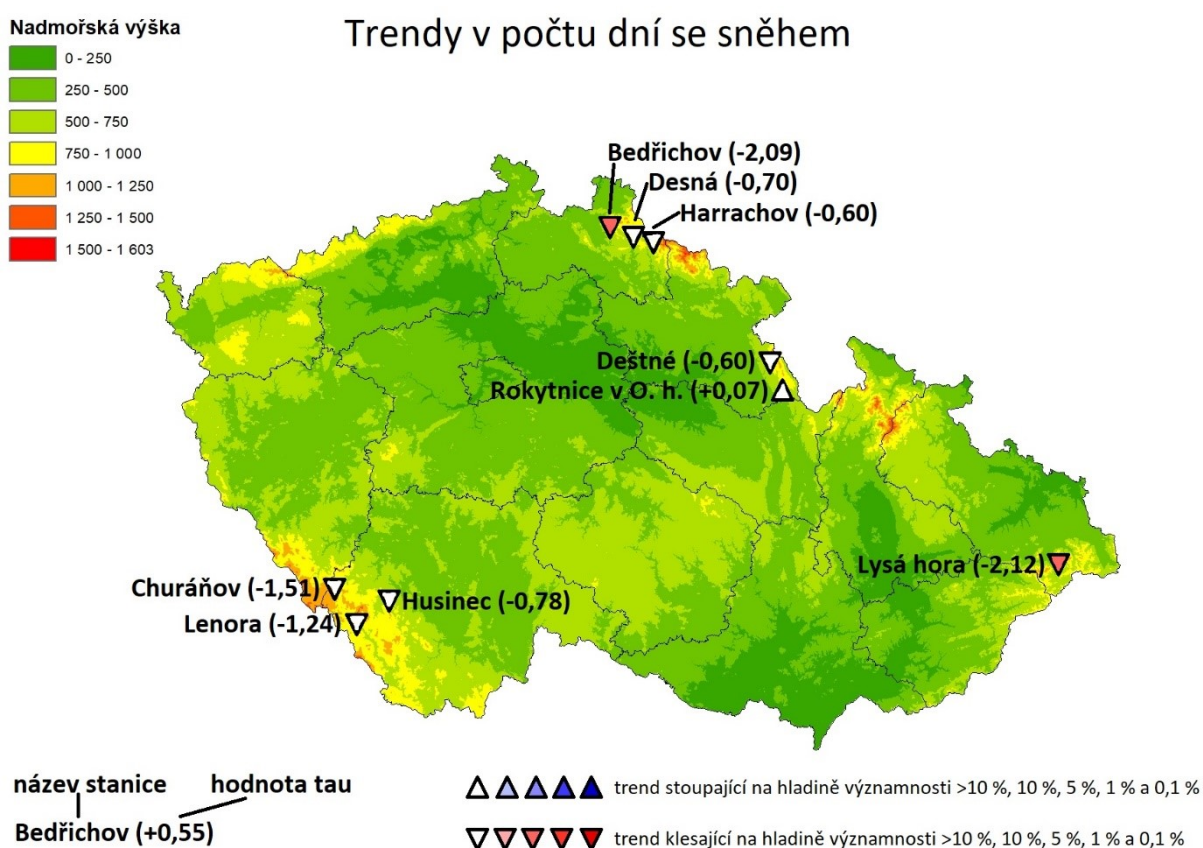


Obr. 15– Mapa trendů v maximální hodnotě SWE

Počet dní se sněhem

Tento parametr určuje, kolik dní v hydrologickém roce byla na dané stanici přítomná sněhová pokrývka. Tato hodnota, jako většina parametrů závisí hlavně na nadmořské výšce a také na množství zimních srážek. V tomto parametru je možné znovu pozorovat podobnost mezi stanicemi v rámci pohoří, ale mezi jednotlivými pohořími jsou podstatné rozdíly. Maxima a minima jsou pozorována často v jiných letech. Společným minimem pro všechny stanice jsou roky 1990, 2007 a 2014 a společným maximem 1996 a 2006. Nejvíce dní se sněhem bylo pozorováno na Lysé hoře, a to díky kombinaci vysokých úhrnů a nízkou průměrnou teplotou způsobenou vysokou nadmořskou výškou. Ve většině let se zde počet dnů se sněhovou pokrývkou nad hranicí 150 dní za rok. Znamená to tedy, že na Lysé hoře sníh ležel minimálně 5 měsíců v roce. Na opačném konci je poté stanice Husinec, kde ležela sněhová pokrývka déle než 80 dnů v roce pouze ve třech hydrologických letech 1987, 1996 a 2006.

Pomocí Mann-Kendall testu byly odhaleny klesající trendy na hladině významnosti 5 % na stanicích Bedřichov (-7,8 dne/10 let) a Lysá hora (-6,4 dne/10 let). I na ostatních stanicích s výjimkou stanice Rokytnice v Orlických horách, kde byl sklon trendu v podstatě nulový (+0,1 dne/ deset let), byl vývoj tohoto parametru záporný. Tato informace naznačuje, že se délka sezony se sněhem na území ČR zkracuje a počet dní, kdy leží na povrchu sněhová pokrývka se snižuje.



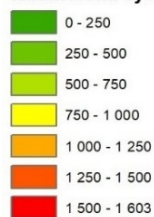
Obr. 16 – Mapa trendů v počtu dní se sněhem

Datum tání sněhové pokrývky

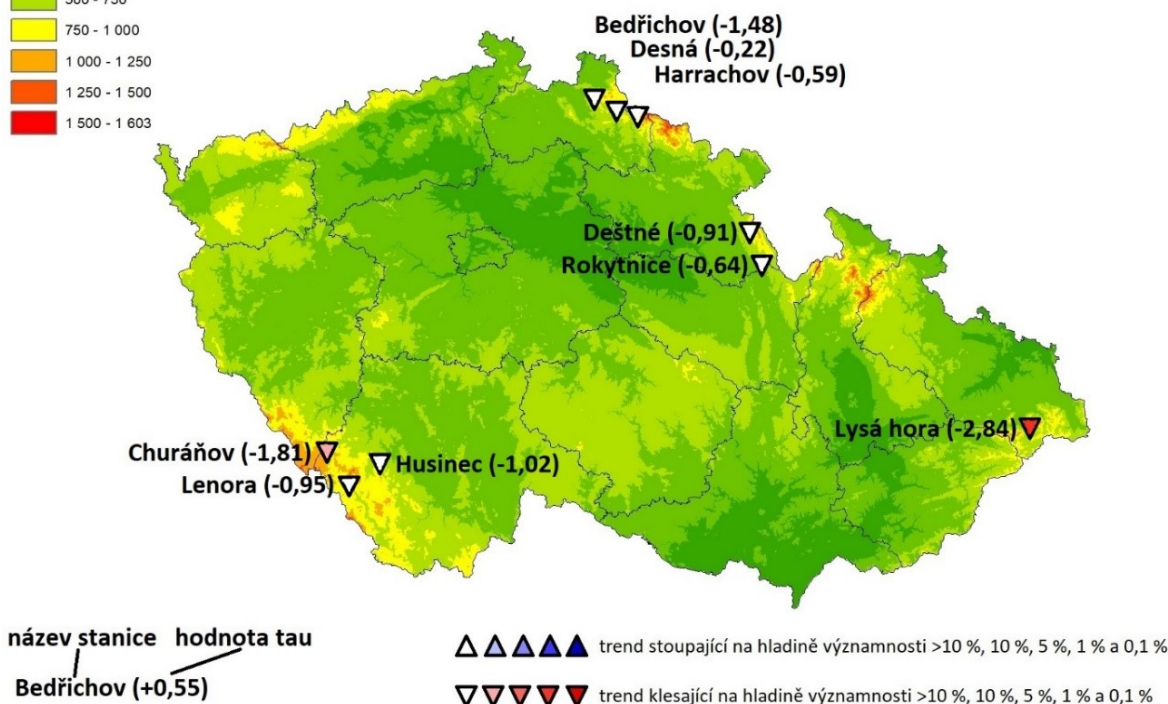
Tento parametr určuje kolikátý den hydrologického roku roztála sněhová pokrývka po maximu výšky sněhu daný rok. Nebereme tedy v potaz jarní sněhovou pokrývku, která se vytvořila až po roztátí souvislé sněhové pokrývky. Zejména v teplejších letech a na stanicích s nižší nadmořskou výškou se datum tání často vyskytoval už před Novým rokem, nebo začátkem ledna, kdy jsou časté oblevy. Sněhová pokrývka se většinou znovu objevila, ale již nedosahovala takové výšky jako před roztáním. Tyto situace byly nejčastěji pozorovány na stanicích Husinec a Rokytnice v Orlických horách. Jako příklad lze uvést rok 1989, kdy na stanici Husinec sníh roztál už na konci listopadu. V roce 2014 proběhlo tání velice brzy na všech zkoumaných stanicích. Nejpozdější tání probíhá na stanici Lysá hora, kde většinu let vydržel sníh až do konce dubna a v několika případech až do května. Na stanici Lysá hora je také nejlépe znatelný posun tání na dřívější datum.

Trendy v posunu data tání sněhu se zdají být výraznější na stanicích s vyšší nadmořskou výškou. Nejsilnější trend pozorujeme na stanici Lysá hora, kde byl nalezen na hladině významnosti 1 %. Posun je zde znatelný v průměru o 6 dní za dekádu. Druhou stanicí, kde byl prokázán trend, a to na hladině významnosti 10 % je stanice Churáňov (také -6 dní za dekádu), která je zároveň z hlediska nadmořské výšky druhá nejvýše položená ze zkoumaných stanic. Na všech stanicích byla pozorována záporná hodnota tau, což značí že se datum tání posouvá pravděpodobně na všech místech ČR, i když v nižších polohách nebyl posun tak výrazný.

Nadmořská výška



Trendy v datu tání sněhu



Obr. 17– Mapa trendů v datu tání sněhové pokrývky

parametr	Churáňov	tau	Lenora	tau	Husinec	tau	Bedřichov	tau	Desná	tau
SCE max	-	-1,58	-	-0,5	-	-0,5	-	0,24	-	-0,04
SCE avg	-	-1,05	-	0,34	-	-0,34	-	0,77	-	-0,31
Nd	-	-1,51	-	-1,2	-	-0,78	5%	-2,09	-	-0,7
SWE max	-	-0,87	5%	2,07	-	0,17	-	0,03	-	-0,34
Den tání	10%	-1,81	-	-1	-	-1,02	-	-1,48	-	-0,27
snowfall fraction	0,10%	-3,35	1%	-2,6	5%	-2,13	-	-1,56	-	-0,77
T	1%	3,24	5%	2,47	-	0,91	5%	2,1	5%	1,99
P	-	0,71	-	0,48	-	-0,03	-	0,51	-	-0,65
	Harrachov	tau	Deštné	tau	Rokytnice	tau	Lysá hora	tau		
SCE max	-	0,81	-	-0,7	-	0,6	-	-1,07		
SCE avg	-	-0,02	-	-1,5	-	-0,34	-	-0,99		
Nd	-	-0,6	-	-0,7	-	0,07	5%	-2,12		
SWE max	-	0,33	-	-0,7	-	0,53	-	0,03		
Den tání	-	-0,59	-	-0,9	-	-0,64	1%	-2,84		
snowfall fraction	-	-0,45	-	0,11	-	-0,34	-	-0,03		
T	-	1,42	-	1,31	10%	1,96	0,10%	3,41		
P	-	0,68	-	-1,6	-	0,31	-	1,22		

Obr. 18 – Přehledová tabulka všech ročních trendů ve zkoumaných parametrech

6. Diskuse

Prvním problémem při tvorbě praktické části byly přítomné výpadky měření z klimatických a sněhoměrných stanic. Kvůli delším výpadkům byly během tvorby této práce vyřazeny hned dvě stanice, kdy byly výpadky příliš dlouhé na doplnění, nebo nebyla v rozumné vzdálenosti jiná stanice. Doplnňování probíhalo pomocí ověření závislosti dat na kompletních letech pomocí lineární regrese a pomocí hodnoty R^2 bylo ověřeno, že lze transponovat data ze druhé stanice pomocí rovnice lineární regrese. Je nutné říct, že výpadky nebyly ve většině případů delší než jeden měsíc, a tudíž by to nemělo ve výsledku mít na výsledky velký vliv. Doplněvány byly například data teploty pro stanici Rokytnice v Orlických horách s pomocí dat ze stanice Deštné. Data s výškami sněhu a SWE (vodní hodnotou sněhu) byla na všech stanicích kompletní. Jediná výraznější nepřesnost v měření mohla vzniknout na stanici Lenora, kdy byly hodnoty SWE v první polovině zkoumaného období podezřele nízké i přes vcelku průměrné hodnoty ostatních parametrů. Byla to také jediná stanice, kde se prokázal významný trend ve vývoji hodnot SWE, a to ještě k tomu kladný, což příliš nekoresponduje s vývojem ostatních parametrů na této stanici. Tato data je tedy nutné brát s rezervou a bylo by nutné ověřit správnost měření na této stanici.

Jako další výrazný problém v datech by mohla být označena absence sněhoměrných dat ze stanice Harrachov z let 2013 a 2014. Tím se již dostáváme za hranu použitelnosti Mann-Kendall testu pro ověření trendů v datových řadách. Obecně se za spodní hranici počtu zkoumaných let pro zjištění trendu považuje 35 let, což je počet, kterého bylo dosaženo na všech ostatních stanicích s výjimkou Harrachova. Zde již hrozí, že jednotlivé extrémní roky jako v našem případě roky 2005 a 2006 příliš ovlivní výpočty trendu a například zmírní klesající trendy v počtu dní se sněhem, nebo data tání sněhové pokrývky. Obecně by bylo vhodnější, kdyby byly zkoumané časové řady alespoň o deset let delší a ideální by bylo výzkum doplnit ještě o období 2015-2020, kdy byly sněhové poměry v ČR průměrně velice slabé a pravděpodobně by se stávající trendy zvýraznily, nebo by se objevily nové.

Jako problém se dá zmínit i vcelku nízký počet horských stanic s kompletní datovou řadou klimatických faktorů v České republice. V této práci zcela chybí pohoří jako Krušné hory, Vysočina, Hrubý Jeseník, nebo Kralický Sněžník. V této práci není zahrnuta ani jedna ze dvou nejvýše položených stanic v Krkonoších (Luční bouda a Labská bouda) kvůli nesouvislým datům s častými a velmi dlouhými výpadky měření.

Klimatologická data z horských stanic jsou velice ceněna, ale jejich měření s sebou přináší některá úskalí, která souvisí se specifickými podmínkami na těchto stanicích. Značné problémy činí v horských oblastech hlavně měření srážek, kdy měření silně ovlivňuje zejména vítr. Větší rychlosti větru ve vyšších nadmořských výškách způsobují vyvanutí srážek ze srážkoměru (undercatch), který se projevuje snižováním naměřených úhrnů o 2-15 % u kapalných a 10-50 % u tuhých srážek. Největší chyba v měření bývá pozorována při velice nízkých teplotách, kdy se vyskytuje lehký prachový sníh s nízkým obsahem vody, a tudíž i hmotností. V chladném období roku se setkáváme i s opačným jevem, kdy dochází k navívání sněhu do srážkoměru. Na horských stanicích je problematické také měření sněhové pokrývky, které také může být silně ovlivněno transportem sněhu větrem. Místa pro měření je tedy nutné vybrat tak, aby nebyla na návětrné, nebo závětrné straně nějaké blízké překážky, která by ovlivňovala proudění vzduchu a měnila tak podmínky pro akumulaci sněhu (Kliegrová a Hynčica, 2018).

Z hlediska zpracování dat by k větším problémům kromě relativně krátkých datových řad docházet nemělo. Pro výpočet poměru sněhových a celkových srážek (snowfall fraction) byla použita standartně používaná hodnota 1 °C, která vcelku dobře zobecňuje hranici mezi sněžením a deštěm. Tato hodnota samozřejmě závisí zejména na vlhkosti vzduchu a nemusí tedy přesně vypovídat realitě. Při výpočtu parametru s hodnotou teploty 0 °C však nebyly výsledky nijak významně odlišné.

V rešeršní části jsou základem z převážné většiny zahraniční články zaměřené na změny sněhové pokrývky, metody k vyhodnocování sněhové pokrývky, důsledky změn sněhové pokrývky a také budoucí vývoj sněhové pokrývky. Velké zastoupení z hlediska polohy mají výzkumy z Alp (Švýcarsko, Rakousko, Německo a Itálie). Velké množství výzkumů na toto téma vzniká v oblasti asijských pohoří Himaláje, Ťan-Šanu, oblasti tibetské náhorní plošiny a Sibiřské subpolární a polární oblasti. V práci se také objevují výzkumy z pohoří Spojených států a jihoamerických And.

Největší vliv na vývoj sněhové pokrývky má celosvětově zvyšování průměrných teplot vzduchu, a to zejména v chladné části roku. K nejrychlejšímu nárůstu teplot dochází v období jara, kdy se zrychluje tání sněhové pokrývky. Tato skutečnost se potvrzuje i v této práci vzhledem k malým změnám v úhrnech srážek. Podle Mei (2014) v důsledku zvyšování teplot dochází ke změně poměru sněhových a celkových srážek, a to zejména v jarních měsících. V tomto výzkumu se prokázal snížený poměr jak v jarních měsících, tak i na

začátku zimy v listopadu. Klesající tendence v počtu dní se sněhem také odpovídá výsledkům ostatních výzkumů z evropských pohoří. Opačné výsledky jsme získali v pohořích s velkou nadmořskou výškou, kde se průměrná roční teplota stále drží pod bodem mrazu a vlivem zvýšení úhrnů srážek vlivem zvýšeného výparu z vodních ploch ovlivňujících dané horské pásmo. Taková situace byla zjištěna například na většině stanic v pohoří Āan-Šan, kde roste průměrná výška sněhové pokrývky i počet dní se sněhem (Li, 2019). Huth a Pokorná (2004) provedli analýzu jednadvaceti klimatických stanic v České republice pro období od roku 1961 do roku 1998 a v této studii bylo zjištěno, že trendy roční průměrné teploty dosahují nárůstu 0,16 až 0,33 °C za dekádu. Je zde ovšem značná variabilita mezi ročními obdobími. Největší nárůsty jsou pozorovány v zimních měsících, konkrétně 0,4 až 0,65 °C za dekádu. Naopak pro podzim jsou teplotní trendy záporné a například v období 1961–1998 dosahují hodnot od -0,09 do -0,26 °C za dekádu. Denní amplituda teploty na podzim klesá, zatímco v ostatních obdobích roste. Toto zjištění není v souladu s výsledky výzkumů v jiných zemích, které se nacházejí dále od oceánu, kde dochází ke zmenšení denní amplitudy teplot jako důsledek většího růstu minimálních teplot než teplot maximálních (Horton, 1995).

Rozdílem oproti výzkumům v ostatních pohořích byla rychlost změn v různých nadmořských výškách. Zatímco v ostatních výzkumech bylo zjištěno, že změny v parametrech sněhové pokrývky jsou rychlejší ve středních a nízkých výškách, výsledky této práce naopak ukazují na rychlejší změny na stanicích s vyšší nadmořskou výškou (Churáňov a Lysá hora). Tento rozdíl ale bude pravděpodobně způsoben rozdílem vnímání nadmořských výšek například v Alpských zemích, kde byl i mnohem větší rozsah nadmořských výšek stanic. Stanice Lysá hora bude v ČR spadat mezi nejvyšší, ale v Rakousku by spadala spíše do střední výškové oblasti. Nicméně v rámci České republiky je závislost výšky na síle trendu opačná než v případě ostatních studií.

Pokud se změny ve sněhové pokrývce nezačnou zpomalovat, tak se může stát, že sníh z nižších poloh zmizí zcela, nebo se bude vyskytovat jen zřídka. I ve středních a vysokých polohách se dá v budoucnosti očekávat výrazný úbytek sněhové pokrývky, a to zejména kvůli posunu nástupu sněhové pokrývky kvůli silnému zvyšování listopadových teplot a také bude docházet k posunu tání dříve do jarního období. Vzhledem k vývoji teplot se bude přibývat množství oblev v zimním období, což může způsobovat například problémy s povodněmi z takzvaných rain-on-snow (déšť na sněhovou pokrývku) událostí.

Podobně jako v případě ostatních studií z Evropy se na rozdíl od studií z asijských pohoří na změnách ve sněhové pokrývce nepodílí změny v ročních úhrnech srážek. Úhrny srážek na území ČR se v období 1980-2014 nijak zásadně neměnily a žádné významné trendy se zde nepotvrdily.

Pokud budou změny sněhové pokrývky pokračovat podobným tempem jako doposud, nebo se budou dokonce zrychlovat, dají se očekávat velké důsledky pro přírodu a lidskou populaci, a to nejen v horských oblastech. Voda ze sněhu v České republice tvoří klíčovou složku odtokového režimu převážné většiny velkých českých řek a dá se do budoucna očekávat, že se průtoky v zimě a na jaře budou čím dál více vyrovnávat. Jarní průtoková maxima nebudou tak výrazná a budou nastávat dříve z jara. Snižování sněhové pokrývky má také negativní vliv na doplňování kolektorů podzemní vody, které zásobují české řeky v letních obdobích chudých na srážky bazálním odtokem. To může vést ke snižování letních a podzimních průtoků a k negativním změnám v ekosystémech vysychajících částí koryta. Ubývání vody v korytech řek způsobuje snižování břehové infiltrace z řek do říčních náplavů a může tak do budoucnosti způsobovat problémy v zásobování obyvatelstva vodou. Bude nutné budovat další technologická řešení, jako je umělá infiltrace, která umožňuje zasakovat vodu během vyšších průtoků v řekách a uschovat jí na suchá období. Toto řešení se zdá vhodnější, než akumulace ve vodárenských nádržích z hlediska přirozeného čištění a absenci odparu.

Další oblast, která změny sněhové pokrývky silně pocítuje je turistický ruch v zimním období. V posledních letech mají lyžařské areály v českých horách problémy s množstvím přírodního sněhu, který často nestačí pro jejich provoz. Zejména areály v nižších nadmořských výškách bez investic do pokročilých technologií zasněžování již téměř fungovat nemohou. Velké skiareály jako je Špindlerův Mlýn, Harrachov nebo Pec pod Sněžkou již umělé zasněžují více jak 90 % svých sjezdových tratí, což vytváří nezanedbatelné odběry vody z již tak nízkých zimních průtoků (Novický et al., 2009).

7. Závěr

Cílem práce bylo vyhodnocení poznatků o změnách sněhové pokrývky v dostupné literatuře a v praktické části analyzovat situaci na vybraných horských stanicích v České republice v období hydrologických roků 1980-2014. Ve světě se jedná o velice aktuální téma a vzniká velké množství studií a prognóz.

Z dostupné literatury je zřejmý vliv změny klimatu, a to zejména zvyšování teplot vzduchu nejen v chladné polovině roku. Pozorovány byly také změny v průměrné výšce sněhové pokrývky, počtu dní se sněhem, hodnotě SWE a datu nástupu a tání sněhové pokrývky. Byly také pozorovány opačné trendy v pohoří Āan-Šan, kde vlivem zvyšování úhrnů srážek vlivem zvýšeného výparu z vodních ploch a stále dostatečně nízkých teplot hodnoty těchto parametrů rostou. Výzkumy také potvrzují další jevy, jako vliv na odtokový režim řek, snižování bazálního průtoku, promrzání půdy, poškození rostlin a prodlužování vegetační sezóny. Vzhledem k izolačním schopnostem také dochází k dřívějšímu prohřívání a odparu z půdy, což může mít za následek další oteplování a dřívější nástup sucha. Snižování zásob vody ve sněhu má také velký vliv na zásobování obyvatel vodou, a to zejména v semiaridních oblastech.

Analýza klimatických charakteristik v horských oblastech ČR prokázala významné trendy v parametru průměrná roční teplota vzduchu na všech stanicích a v teplotě se projeví trendy i na měsíčních průměrech, kdy byl nárůst významný zejména na okrajích zimní sezóny, a to v listopadu a dubnu. Na stanicích na Šumavě se prokázal klesající trend v parametru snowfall-fraction (poměr sněhových a celkových srážek) i na roční úrovni. Posun data tání sněhové pokrývky byl prokázán trendem pouze na nejvýše položených stanicích Churáňov a Lysá hora. V počtu dní se sněhem byl pozorován pokles na všech stanicích, ale významný trend byl nalezen jen na stanicích Bedřichov a Lysá hora. Poslední parametr, kde byl nalezen kladný trend je maximální roční SWE na stanici Lenora. Tento trend je ale spíše výsledkem chybných dat v první části sledovaného období. Více trendů bylo nalezeno na úrovni měsíčních průměrů. Zde byly prokázány významné klesající trendy v měsících listopad a duben v parametrech průměrná výška sněhové pokrývky i poměr sněhových a celkových srážek. V parametrech maximální výška sněhové pokrývky a roční úhrn srážek žádné významné trendy odhaleny nebyly.

Zdroje

- ANDĚRA, Miloš a Petr ZAVŘEL. Šumava: příroda, historie, život. Vyd. 1. Praha: Baset, 2003, 800 s. ISBN 80-7340-021-9.
- BALATKA, Břetislav a KALVODA, Jan. Geomorfologické členění reliéfu Čech = Geomorphological regionalization of the relief of Bohemia. Praha: Kartografie Praha, 2006. ISBN 80-7011-913-6.
- BARNETT, T.P., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438 (7066), 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- BLAHUŠIAKOVÁ, A., Matoušková, M. (2015). Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: The upper Hron River basin, Slovakia). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3), 183–192. <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0030>
- BRUNETTI et al., 2006, M. Brunetti, M. Maugeri, F. Monti, T. Nanni. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int. J. Climatol.*, 26 (3) (2006), 345-381
- CLOW, D. W. (2010), Changes in the timing of snowmelt and streamflow in Colorado: A response to recent warming, *J. Clim.*, 23, 2293–2306, doi:10.1175/2009JCLI2951.1.
- COLBECK, S. C., et al. (1990) The international classification for seasonal snow on ground. International Commission on Snow and Ice of IAHS
- CUFFEY, K.M., Paterson, W.S.B., 2010. *The Physics of Glaciers*. Elsevier Science
- ČHMÚ, Rok 2019 v Česku. www.infomet.cz [online]. ČHMÚ, 2020-01-08 [cit. 2020-01-08]. Dostupné online.
- ČHMÚ. Stanovisko ČHMÚ k AR4. www.bourky.com [pdf]. 22.2.2007. Dostupné online.
- DEWALLE, David R. a Albert RANGO. *Principles of snow hydrology*. New York: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-82362-3.
- FLOUSEK, Jiří, ed. Krkonoše: příroda, historie, život. Praha: Baset, 2007. ISBN 978-80-7340-104-7.
- FOSTER, L. M., Bearup, L. A., Molotch, N. P., Brooks, P. D., & Maxwell, R. M. (2016). Energy budget increases reduce mean streamflow more than snow-rain transitions: Using integrated modeling to isolate climate change impacts on Rocky Mountain hydrology. *Environmental Research Letters*, 11(4), 44015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044015>

- GRAY, D. M., B. Toth, L. Zhao, J. W. Pomeroy, and R. J. Granger (2001), Estimating areal snowmelt infiltration into frozen soils, *Hydrol. Processes*, 15, 3095–3111, doi:10.1002/hyp.320
- HORTON, B. (1995): Geographical distribution of changes in maximum and minimum temperatures. *Atmospheric Research* 37, 101-117.
- HIRSCH, R.M., J.R. Slack, and R.A. Smith. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research* 18(1):107-121.
- HUANG, X., Deng, J., Ma, X., Wang, Y., Feng, Q., Hao, X., Liang, T., 2016. Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China. *Cryosphere* 10 (5), 2453–2463. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2453-2016>.
- HUTH, R., Pokorná, L. (2004): Trendy jedenácti klimatických prvků v období 1961–1998 v České republice. *Meteorologické zprávy* 57, 168-178
- IMMERZEEL, W.W., Bierkens, M.F.P., 2012. Asia's water balance. *Nat. Geosci.* 5 (12), 841–842. <https://doi.org/10.1038/ngeo1643>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007), *Climate Change 2007: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, New York.
- IWATA, Y., M. Hayashi, S. Suzuki, T. Hirota, and S. Hasegawa (2010), Effects of snow cover on soil freezing, watermovement, and snowmelt infiltration: A paired plot experiment, *Water Resour. Res.*, 46, W09504, doi:10.1029/2009WR008070.
- JABBAR, Abdul, Othmann ARSALAN AHMED, Merkel BRODER a Hasan SYED. Change detection of glaciers and snow cover and temperature using remote sensing and GIS: A case study of the Upper Indus Basin, Pakistan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* [online]. 2020, 2020, 2020(18), 1-19 [cit. 2020-05-27]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100308>.
- JENICEK, M., Seibert, J., Staudinger, M. (2018). Modeling of future changes in seasonal snowpack and impacts on summer low flows in Alpine catchments, *Water Resources Research*, 54(1), 538-556. doi: 10.1002/2017WR021648.
- JENICEK, M., Ledvinka, O. (2020). Importance of snowmelt contribution to seasonal runoff and summer low flows in Czechia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 (7), 3475–3491. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3475-2020>.
- JOHANSSON, H., and L.-C. Lundin (1991), Surface runoff and soil water percolation as affected by snow and soil frost, *J. Hydrol.*, 122,141–159, doi:10.1016/0022-1694(91)90177-J

KLIEGROVÁ, Stanislava a Martin HYNČICA. Měření vybraných meteorologických prvků na Labské a Luční boudě v chladné části roku. Meteorologické zprávy. 2018, 2018(71), 122-126.

LAAHA, G., Parajka, J., Viglione, A., Koffler, D., Haslinger, K., Schoner, W., et al. (2016). A three-pillar approach to assessing climate impacts on low flows. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3967–3985. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3967-2016>

LEE, Sukyoung (2014). "A theory for polar amplification from a general circulation perspective". *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*. 50 (1): 31–43. doi:10.1007/s13143-014-0024-7

LI Qian, YANG Lao, ZHOU Hongfei; Paterns in snow depth maximum and snow cover days in the Tian-Shan mountains, *Atmospheric Research* 228 (2019) 14-22

MALMROS, Sebastian H. Mernild, Ryan Wilsone, Torbern Tagesson, Rasmus Fensholt. Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment* 209 (2018) 140-252.

MARCOLINI, Giorgia, Bellin ALBERTO, Disse MARKUS a Chiogna GABRIELE. Variability in snow depth time series in the Adige catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies* [online]. 2017, 2017(13), 240-254 [cit. 2020-05-27]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.007>.

MARTY Christopher, *Climate Change and Snow Cover in the European Alps, The Impacts of Skiing on Mountain Environments*, 2013, 30-44 [online]

MARTY, C., Schlögl, S., Bavay, M., & Lehning, M. (2017). How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, 11(1), 517–529. <https://doi.org/10.5194/tc-11-517-2017>

MARTY, Christoph, Anna-Maria TILG a Tobias JONAS. Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalent in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*. 2017, 18(4), 1021-1031. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0188.1. ISSN 1525-755X.

MASIOKAS, M.H., Villalba, R., Luckman, B.H., Le Quesne, C., Aravena, J.C., 2006. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: largescale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *J. Clim.* 19, 6334–6352.

MCCABE, G. J., and M. P. Clark (2005), Trends and variability in snowmelt runoff in the western United States, *J. Hydrometeorol.*, 6, 476–482, doi:10.1175/jhm428.1.

MEI, Y, E.N. Anagnostou, E.I. Nikolopoulos, M. Borga. Error analysis of satellite precipitation products in mountainous basins. *J. Hydrometeorol.*, 15 (5) (2014), 1778-1793

MUDRYK, L., Luoju, K., Helfrich, S. (2018). Terrestrial snow cover in the Arctic [in *State of the Climate in 2017*]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S87–S88.

NEVRLÝ, Miloslav. Kniha o Jizerských horách. Ústí nad Labem: Severočeské nakladatelství, 1981, 2007 (Vestri).

NOVICKÝ O., et al. (2009): Prognostická studie o vlivu odběru vody pro technické zasněžování na průtoky hlavních krkonošských toků k roku 2025. Výzkumná zpráva, SVTI VÚV T.G.M., v.v.i., Praha, s. 1-49.

ØYGARDEN, L. (2003), Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway, Catena, 50, 217–242, doi:10.1016/S0341-8162(02)00138-8

PENG, Shilong Piao, Philippe Ciais, Pierre Friedlingstein, Liming Zhou and Tao Wang. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Envir. Res. Lett.* 2013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014008>

QIN, D.H., Liu, S.Y., Li, P.J., 2006. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in western China. *J. Clim.* 19 (9), 1820–1833.

ROBINSON, D.A. (2018). Northern Hemisphere continental snow cover extent [in *State of the Climate in 2017*]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S22–S23.

SCHERRER, S.C., C. Appenzeller, and M. Laternser, Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local-and large-scale climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 2004. 31.

SINGH, Pratap, SINGH, Vijay. *Snow and Glacier Hydrology*. Dordrecht: Kluwert Academic Publishers, c2001. 742 s. ISBN 0-7923-6767-7.

SURIANO Zachary, ROBINSON David, LEATHERS Daniel; CHANGING SNOW DEPTH IN GREAT LAKES BASIN, *Anthropocene* 29 (2019) 100208

TAGUE, C., & Grant, G. E. (2004). A geological framework for interpreting the low-flow regimes of Cascade streams, Willamette River Basin, Oregon. *Water Resources Research*, 40, W04303. <https://doi.org/10.1029/2003WR002629>

TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.

TOLASZ, Radim. ROK 2018 V ČESKÉ REPUBLICE. *portal.chmi.cz* [online]. Český hydrometeorologický ústav, 2019-01-14 [cit. 2019-01-15]. Dostupné online.

TOLASZ, Radim, a kol. *POČASÍ, PODNEBÍ, VODA A KVALITA OVZDUŠÍ V ČR V ROCE 2015 – VYBRANÉ UDÁLOSTI* [online]. Český hydrometeorologický ústav, 2016-01-13 [cit. 2016-02-04]. Dostupné online.

WHITEMAN, C. David (2000). Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. Oxford University Press. ISBN 0-19-513271-8.

VYSOUDIL, Miroslav. Meteorologie a klimatologie pro geografu. 1. vyd. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 1997. 232 s. ISBN 80-7067-773-2.

WÜRZER, S., WEVER, N., JURAS, R., LEHNING, M., JONAS, T. (2017): Modelling liquid water transport in snow under rain-on-snow conditions - Considering preferential flow. Hydrology and Earth System Sciences, 3, 21, 1741–1756.

Xoplaki et al., 2004, E. Xoplaki, J. Gonzalez-Rouco, J.U. Luterbacher, H. Wanner. Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. Clim. Dyn., 23 (1) (2004), 63-78

You, Q.L., Kang, S.C., Ren, G.Y., Fraedrich, K., Pepin, N., Yan, Y.P., Ma, L.J., 2011. Observed changes in snow depth and number of snow days in the eastern and central Tibetan Plateau. Clim. Res. 46, 171–183.

Yu, Liu, Zhang, 2017. Temporal and spatial changes in snow cover and the corresponding radiative forcing analysis in Siberia from 1970s to the 2010s. Adv. Meteorol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9517427>

Internetové zdroje

Měření výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky. Dostupné z: <https://www.fiedlerams.cz/cs/produkty/meteorologick-stanice-sn-ma-e-idla/meteorologick-stanice-speci-ln-m-c-sestavy/m-en-v-ky-vod>

Klimatická změna. Klimatická změna [online]. 2020 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: www.klimatickazmena.cz

Krkonošský národní park. KRNAP [online]. 2020, 2020 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: krnap.cz

CHKO Orlické hory. CHKO OH [online]. 2020, 2020 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <http://orlickehory.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko>

CHKO Beskydy. CHKO Beskydy [online]. 2020, 2020 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <http://beskydy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko>

CHKO Jizerské hory. 2020. Dostupné z: <https://jizerskehory.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko/>

Obrazové materiály

Obr. 1 – Stanice na měření výšky sněhu a SWE -
<https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologick-stanice-sn-ma-e-idla/meteorologick-stanice-speci-ln-m-c-sestavy/m-en-v-ky-vod>

Obr. 2 - Teplota tání sněhu v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu (zdroj: DeWalle a Rango (2008))

Obr. 3 - Sněhové pole Mapa republiky na konci dubna 2018 (Jiří Fremuth, 2018, IDNES.cz)

Obr. 4 – Vývoj průměrné výšky sněhu v povodí Velkých jezer (Suriano, 2019)

Obr. 5 - Průměrný počet dní se sněhem v pohoří Ťan-Šan (LI Qian, YANG Lao, ZHOU Hongfei; PATERNS IN SNOW DEPTH MAXIMUM AND SNOW COVER DAYS IN THE TIAN-SHAN MOUNTAINS, Atmospheric Research 228 (2019) 14-22)

Obr. 6 – Budoucí vývoj počtu dní s pokrývkou nad 10 cm (klimatickazmena.cz)

Obr. 7 – Přehledová mapa stanic

Obr. 8 – Klimadiagramy stanic zkoumaných v praktické části

Obr. 9- Mapa trendů průměrné roční teploty na stanicích

Obr. 10– Tabulka měsíčních trendů průměrné teploty vzduchu

Obr. 11- Roční úhrny srážek na stanicích (v mm)

Obr. 12- Mapa trendů poměru sněhových a celkových srážek

Obr. 13 – Tabulka měsíčních trendů v poměru sněhových a celkových srážek

Obr.14 – Tabulka měsíčních trendů v průměrné výšce sněhové pokrývky

Obr. 15– Mapa trendů v maximální hodnotě SWE

Obr. 16 – Mapa trendů v počtu dní se sněhem

Obr. 17– Mapa trendů v datu tání sněhové pokrývky

Obr. 18 – Přehledová tabulka všech ročních trendů ve zkoumaných parametrech